

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Návrh a realizace chladicího zařízení s Peltierovým článkem
Design and realization of colling device with Peltier element

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Uhlík**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T003 Aplikovaná elektronika
Téma: **Návrh a realizace chladicího zařízení s Peltierovým článkem**
Design and Realization of Cooling Device with Peltier Element
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rozeberte možnosti použití přenosných chladicích zařízení v lékařských aplikacích.
2. Specifikujte výhody a možné nevýhody použití Peltierových článků s ohledem na energetickou bilanci.
3. Navrhněte a realizujte řídicí systém s Peltierovým článkem pro vybrané konkrétní aplikace.
4. Proveďte praktické ověření realizovaného řídicího systému.

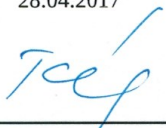
Seznam doporučené odborné literatury:

Katalogové listy dostupné na www.gme.cz,
ostatní dle pokynů vedoucího diplomové práce.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Sládeček, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016
Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Datum odevzdání: 28. 4. 2017

Podpis:

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'M. H. J.' or similar, written on a light background.

Abstrakt

V úvodu práce je čtenář stručně uveden do problematiky chlazení živých tkání a důvodů, proč se chlazení používá. Je uvedeno několik příkladů běžně používaných chladicích metod pro vytvoření představy o současném stavu techniky.

Následně je popsán způsob chlazení pomocí zařízení s Peltierovým článkem a popsán systém, ke kterému bude navrhována regulace. V části, kde se věnuji popisu Peltierových článků, jsou uvedena data o efektivitě a parametrech článků se zhodnocením jejich energetické bilance a uvedením jejich výhod a nevýhod pro dané použití.

V následující části se práce věnuje návrhu regulačního systému. Je zpracován stručný rozbor možností regulace a poté popsán vybraný a realizovaný způsob. Schéma elektronické části je detailně popsáno a jako celek uvedeno v příloze práce, stejně jako program pro použitý mikropočítač. Poslední část práce obsahuje návod pro obsluhu vyrobeného zařízení.

Klíčová slova

Peltierův článek, termoelektrický chladič, TEC, chlazení, lékařské systémy, mikropočítač, mikrokontrolér, pulzně-šířková modulace, regulace, hystereze.

Abstract

At the beginning of this thesis there is a brief introduction to the issue of tissue cooling. There is several examples of commonly used cooling methods for information about current technologies.

Then the method of cooling with Peltier element is described. In part of the thesis, where I describe the Peltier element, the main technical information about thermo-electric cooler are stated with evaluation of their energetic balance and list of advantages and disadvantages of their usage.

In last part of this thesis the control system for cooling tissues is designed. In elaboration of applicable methods of regulation are described advantages and disadvantages. Details of the schematics and software are described. Complete program and layout are in appendix. The last part of this thesis contains user manual.

Key words

Peltier element, thermo-electric cooler, TEC, cooling, medical systems, microcomputer, microcontroller, pulse-width modulation, regulation, hysteresis.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	2
Seznam obrázků a tabulek	4
1. Úvod	6
2. Použití přenosných chladicích zařízení	7
2.1 Techniky chlazení	7
3. Chlazení Peltierovým článkem	9
3.1 Rozbor vlastností Peltierových článků	11
3.2 Shrnutí rozboru	15
4. Návrh regulace	15
4.1 Popis použitého mikropočítače	17
4.2 Schéma zapojení	23
4.3 Mechanické provedení	30
4.4 Program mikropočítače	35
4.5 Ovládání systému	37
5. Ověření činnosti systému	42
6. Závěr	44
7. Literatura	45
8. Seznam příloh	47

Seznam použitých zkratek a symbolů

Q_{\max} – maximální přenesený tepelný výkon Peltierova článku

Q_c – přenesený tepelný výkon Peltierova článku

ΔT_{\max} – maximální provozní rozdíl studené a horké strany Peltierova článku

ΔT – rozdíl studené a horké strany Peltierova článku

T_h – teplota horké strany Peltierova článku

U_{\max} – maximální napětí Peltierova článku

I_{\max} – maximální proud Peltierova článku

I_c – proud kolektorem tranzistoru

I_{cc} – napájecí proud

COP – coefficient of performance, koeficient výkonu

P_{tot} – maximální provozní ztrátový výkon

η – účinnost

PWM – pulse-width modulation, pulzně-šířková modulace

RISC – reduced instruction set core, jádro s redukovanou instrukční sadou

SRAM – static random access memory, statická paměť s náhodným přístupem

UART, USART, EUSART – enhanced universal synchronous-asynchronous receiver-transmitter, rozšířený univerzální synchronně-asynchronní přijímač-vysílač

Bd – baud, jednotka rychlosti sériového přenosu

LED – light emitting diode, světlo emitující dioda

GME – GM electronics, dodavatel elektrosoučástek

$R_{\text{tj-c}}$ – tepelný odpor polovodič-pouzdro

$R_{\text{tc-h}}$ – tepelný odpor pouzdro-chladič

$R_{\text{th-a}}$ – tepelný odpor chladič-okolní vzduch

T_j – teplota polovodičového přechodu

T_h – teplota chladiče

T_a – teplota okolního vzduchu

h_{21e} – zesilovací činitel bipolárního tranzistoru

U_{OH} – výstupní napětí na logickém pinu mikropočítače v úrovni log. 1

ICSP – in-circuit serial programming, programování mikropočítače zapojeného v aplikaci

U_{PROG} – programovací napětí mikrokontroléru

RS-232 – sériová sběrnice

MOSFET – metal-oxide semiconductor field effect transistor, tranzistor řízený polem s izolovanou řídicí elektrodou

$R_{DS(ON)}$ – odpor sepnutého MOSFET tranzistoru

U_{GS} – napětí mezi gate a source MOSFET tranzistoru

T_{hyst1} – šířka teplotního pásma pro první výkonový stupeň chlazení

T_{hyst2} – šířka teplotního pásma pro druhý výkonový stupeň chlazení

T_z – žádaná teplota chladicí hlavice

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 – chladicí gel pro opakované použití [9]	7
Obrázek 2 – chladicí sprej [10]	8
Obrázek 3 – zařízení „Blanketrol“ pro chlazení pomocí cirkulační kapaliny [11]	8
Obrázek 4 – termoelektrický jev; platí $T_2 > T_1$, pro daný druh kovů	9
Obrázek 5 – Peltierův jev [13]	9
Obrázek 6 – Peltierův článek	10
Obrázek 7 – náčrt tzv. termobaterie s Peltierovými články [12]	10
Obrázek 8 – přenesené teplo Pelt. článkem v poměru k napájecímu proudu ($dT = \Delta T$) [14]	12
Obrázek 9 – účinnost přenosu tepla Pelt. článkem (zelená křivka – optimální účinnost; $dT = \Delta T$) [14]	13
Obrázek 10 – plošná chladicí hlavice	16
Obrázek 11 – principiální schéma chladicí hlavice	16
Obrázek 12 - blokové schéma jádra mikropočítače [1]	18
Obrázek 13 – blokové schéma periférií mikropočítače [1]	19
Obrázek 14 – blokové schéma oscilátoru mikropočítače [1]	20
Obrázek 15 – principiální schéma jednoho pinu mikropočítače [1]	21
Obrázek 16 – blokové schéma časovače-čítače Timer1 [1]	22
Obrázek 17 – blokové schéma vysílacího modulu EUSART [1]	23
Obrázek 18 – napájecí obvod řídicí desky	24
Obrázek 19 – náhradní tepelné schéma stabilizátoru	24
Obrázek 20 – chladič V4330N [20]	25
Obrázek 21 – připojení alfanumerického displeje	25
Obrázek 22 – připojení programovacích přípravků	26
Obrázek 23 – připojení oddělovacích optočlenů na straně řídicí desky	27
Obrázek 24 – schéma zapojení spínací desky	28
Obrázek 25 – chladič CHL20B [20]	29
Obrázek 26 – tepelné schéma spínacích tranzistorů	30
Obrázek 27 – přepočtené tepelné schéma pro výpočet maximálního ztrátového výkonu P_{tot}	30
Obrázek 28 – prvotní návrh řídicí desky	31
Obrázek 29 – výsledné provedení řídicí desky	32
Obrázek 30 – možné řešení pro optimální odvod tepla tranzistorů	33
Obrázek 31 – spínací deska s chladičem tranzistorů	34
Obrázek 32 – vývojové prostřední MPLAB X IDE	35
Obrázek 33 – doplněk MPLAB® Code Configurator	36
Obrázek 34 – načtení čidel na sběrnici OneWire po zapnutí	38
Obrázek 35 – přiřazení čidel ke článkům	38
Obrázek 36 – provádění nastavení výkonu snížených stupňů chlazení	39
Obrázek 37 – nastavení hystereze výkonových stupňů regulace	39
Obrázek 38 – nastavení žádané teploty článku	39
Obrázek 39 – základní regulační režim (3 připojené články)	40
Obrázek 40 – princip regulace chlazení, hodnoty Thyst1, Thyst2 a Tž jsou uživatelsky nastavitelné ..	40
Obrázek 41 – regulace jediného článku	41

Obrázek 42 – výběr nastavení	41
Obrázek 43 – chladičí hlavice bodová	42
Obrázek 44 – střída 30 % (patrný přeběh z vyššího mezistupně); růžová – napětí článku (5 V/div); modrá – proud článku (2 A/div); horizont. osa 200 ms/div	43
Obrázek 45 – střída 50 %; růžová – napětí článku (5 V/div); modrá – proud článku (2 A/div); horizont. osa 200 ms/div.....	43

1. Úvod

Obsahem této práce je provést rozbor chladicích technologií, jejich vzájemné porovnání a přinést stručný náhled na tuto problematiku. V práci bude proveden návrh regulace v systému s Peltierovým článkem a bude podrobně popsán.

V první části práce je přehled použití přenosných chladicích zařízení. Přehled běžně používaných způsobů je doplněn o příklady konkrétních aplikací. U Peltierova článku je uveden fyzikální princip funkce a jeho použití v řešeném systému. Dále jsou uvedeny důležité parametry Peltierových článků a zhodnocena jejich efektivita s příkladem parametrů vybraných článků.

Druhá část popisuje samotný návrh a realizaci regulace. Na začátku je stručný rozbor možností regulace chlazení s Peltierovým článkem. V samostatných kapitolách je následně proveden popis použitého mikropočítače, podrobně popsáno schéma zapojení a důvody jednotlivých postupů při návrhu. Na konci jsou pak uvedeny zkušenosti z uvedení do chodu s prototypovým chladicím zařízením.

V přílohách se nachází veškerá technická dokumentace k jednotlivým částem systému.

2. Použití přenosných chladicích zařízení

Léčba otoku nebo zánětu chladivým zábalem je známá metoda umožňující zmenšení bolesti a otoku. Velmi známé jsou chladivé zábaly při horečkách nebo přikládání ledu na otok způsobený zánětem zubů.

Podle [8] bylo zjištěno, že chlad má přímý vliv na rychlost vedení nervového vzruchu do mozku. Po 20 minutách působení ledu se zpomalí vedení podnětu natolik, že dojde ke znecitlivění místa.

2.1 Techniky chlazení

V současné době existují různé techniky chlazení živých tkání. Nejjednodušší technikou je led rozdrcený do plátěných nebo plastových pytlíků. Ty se pak přikládají na poraněnou tkáň. Místo ledu se také používá zmražená zelenina apod. Nevýhodou této metody je nutnost mít dopředu zmražený a uschovaný led. To je náročné na skladovací kapacitu a také není možné využít chlazení např. při cestování.

2.1.1 Chladicí gel

Podobným způsobem, jako je používán led, je používán také chladicí gel. Oproti ledu má výhodu, že ho lze použít opakovaně. Nevýhodou je opět nutnost skladovat gel v lednici nebo mrazáku a také poměrně rychlý zánik chladivého efektu.



Obrázek 1 – chladicí gel pro opakované použití [9]

2.1.2 Chladicí sprej

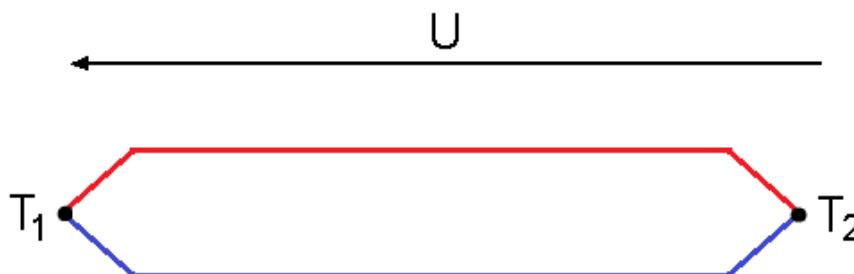
Spreje pracující na chemickém principu způsobí velmi rychlé ochlazení. Jejich výhodou je snadné přenášení a připravenost v každém okamžiku. Chladivý efekt mizí velice rychle, ale ochlazení je efektivní a způsobuje rychlé znecitlivění poraněného místa.

Používané přístroje pro profesionální použití jsou velmi drahé, složité a jejich dostupnost je omezena na kliniky a ordinace. Pro domácí nebo chovatelské potřeby tyto přístroje většinou nejsou určeny.

3. Chlazení Peltierovým článkem

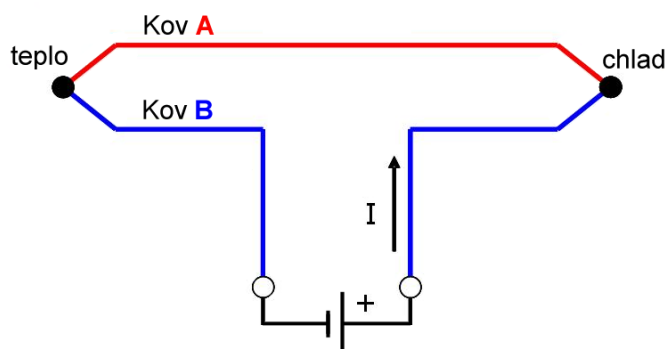
Na základě předchozího zhodnocení byl studenty na fakultě strojní vyvinut systém chlazení tkáně, který splňuje požadavky na dlouhodobé udržení teploty a současně je přijatelný i pro domácí a chovatelské podmínky.

Tento systém využívá jako zdroj chladu Peltierův článek. Peltierův jev je možné přiblížit jako opak k termoelektrickému jevu. Při kontaktním spojení dvou různých kovů vzniká známý termoelektrický jev. Při ohřátí jednoho spoje na vyšší teplotu pak vzniká termoelektrické napětí a obvodem začíná téct proud. [12]



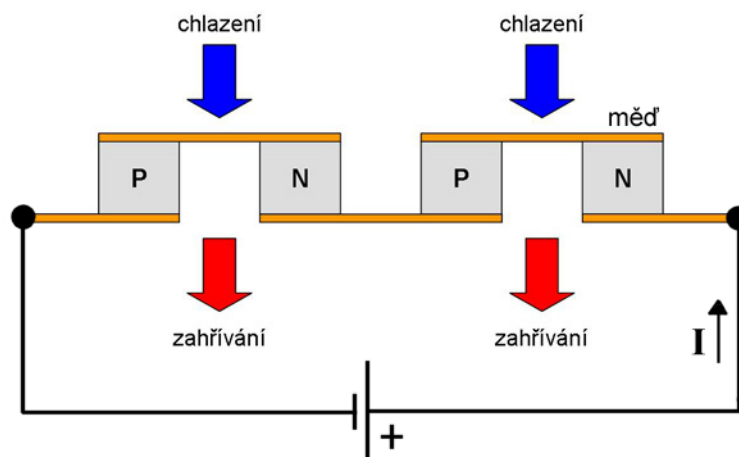
Obrázek 4 – termoelektrický jev; platí $T_2 > T_1$, pro daný druh kovů

Pokud v tomto obvodu vytvoříme uměle elektrický proud, dojde k odebrání tepla na jedné straně a předávání na druhé straně. Tento jev objevil v roce 1834 francouzský fyzik Jean Charles Athanase Peltier (1783 - 1845). [12]



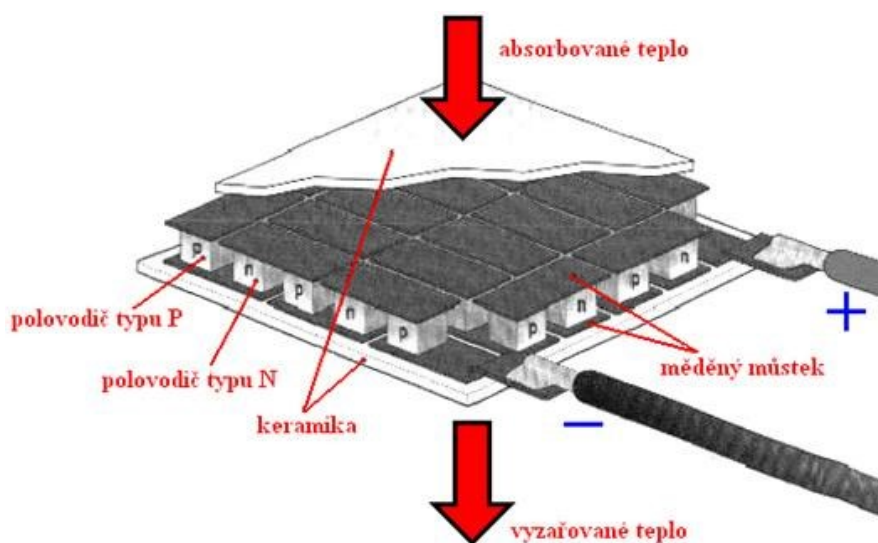
Obrázek 5 – Peltierův jev [13]

Samotný Peltierův článek se pak skládá ze dvou polovodičů, typu P a typu N, a spojovacích můstků. Princip je objasněn na obrázku 6. V polovodiči typu N jsou majoritními nosiči náboje elektrony. Ty jsou odváděny směrem ke zdroji napětí (ke kladnému pólu), mechanicky je jejich směr od chladné strany k teplé straně. Podobně v polovodiči typu P jsou majoritními nosiči náboje díry. Ty jsou také odváděny ke zdroji napětí (k zápornému pólu) a jejich mechanický směr je opět od chladné strany k teplé. Výsledkem procesu je pokles počtu volných nosičů náboje ve spojovacím můstku na chladné straně a tím i poklesem kontaktního (termoelektrického) napětí mezi spojovacím můstkem a polovodiči. Můstek na chladné straně se tedy ochlazuje, zatímco druhý spoj se ohřívá. [12]



Obrázek 6 – Peltierův článek

Základním materiálem pro výrobu Peltierových článků jsou bizmut-telluridy Bi-Te-Se (pro polovodič typu N) a Bi-Sb-Te (pro polovodič typu P). Tyto materiály mají výhodné vlastnosti jako malý měrný elektrický odpor a také malý tepelný odpor. Spojovací můstky jsou nejčastěji měděné. V místě styku vzniká nežádoucí přechodový odpor, který je nutné co nejvíce snížit vhodnou technologií výroby. [12]



Obrázek 7 – náčrt tzv. termobaterie s Peltierovými články [12]

Tyto Peltierovy články se pak zapojují do série, čímž vzniká tzv. termobaterie (obrázek 7). Pro dosažení vyšších teplotních rozdílů je pak možné vytvořit kaskády termobaterií. Články jsou od okolí elektricky izolovány pomocí keramiky s dobrou tepelnou vodivostí. Proti působení vlhkosti se mezery na okrajích zalévají pryskyřicí.

3.1 Rozbor vlastností Peltierových článků

Každý Peltierův článek je charakterizován (kromě rozměrů) čtyřmi základními údaji: Q_{\max} , ΔT_{\max} , U_{\max} , I_{\max} . Parametr Q_{\max} (někdy se označuje také jako $Q_{c\max}$) je udáván ve wattech a určuje maximální množství tepla přeneseného článkem při $\Delta T = 0$ K, proudu článkem $I_{cc} = I_{\max}$ a dané teplotě horké strany (obvykle $T_h = 30$ °C). Napětí U_{\max} je napájecí napětí článku při proudu článkem $I_{cc} = I_{\max}$ a teplotním rozdílu $\Delta T = \Delta T_{\max}$ a dané teplotě horké strany (obvykle $T_h = 30$ °C). [15]

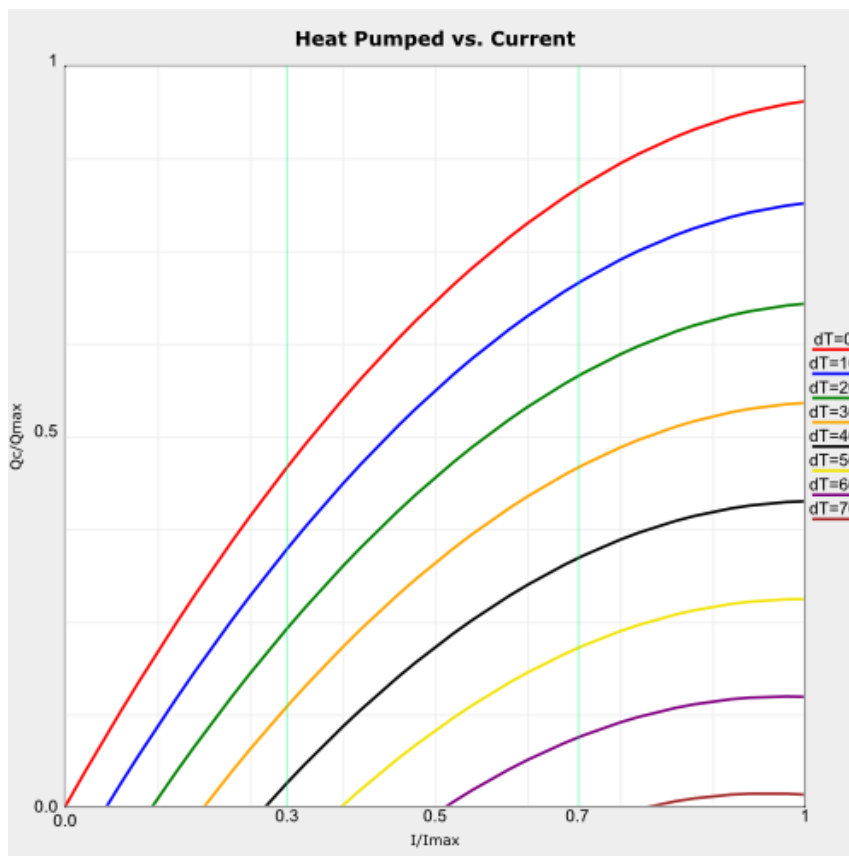
Q_{\max} Množství přeneseného tepla článkem při $\Delta T = 0$ a $T_h = 30$ °C

ΔT_{\max} Maximální teplotní rozdíl mezi studenou a horkou stranou při $I_{cc} = I_{\max}$ a $T_h = 30$ °C. V praxi tento údaj není možné dodržet a jedná se pouze o číslo vyjadřující chladicí kapacitu článku.

I_{\max} Maximální napájecí proud článku při zadané ΔT_{\max} a T_h

U_{\max} Napájecí napětí při proudu I_{\max}

Z toho vyplývá, že při rostoucí teplotě ΔT klesá přenesený výkon. Graf poměru přenášeného výkonu Q_c k teplotě ΔT je na následujícím obrázku 8. [14] Vodorovná osa představuje poměr napájecího proudu článku I_{cc} vůči I_{\max} článku a svislá osa představuje poměr přeneseného výkonu Q_c vůči Q_{\max} .

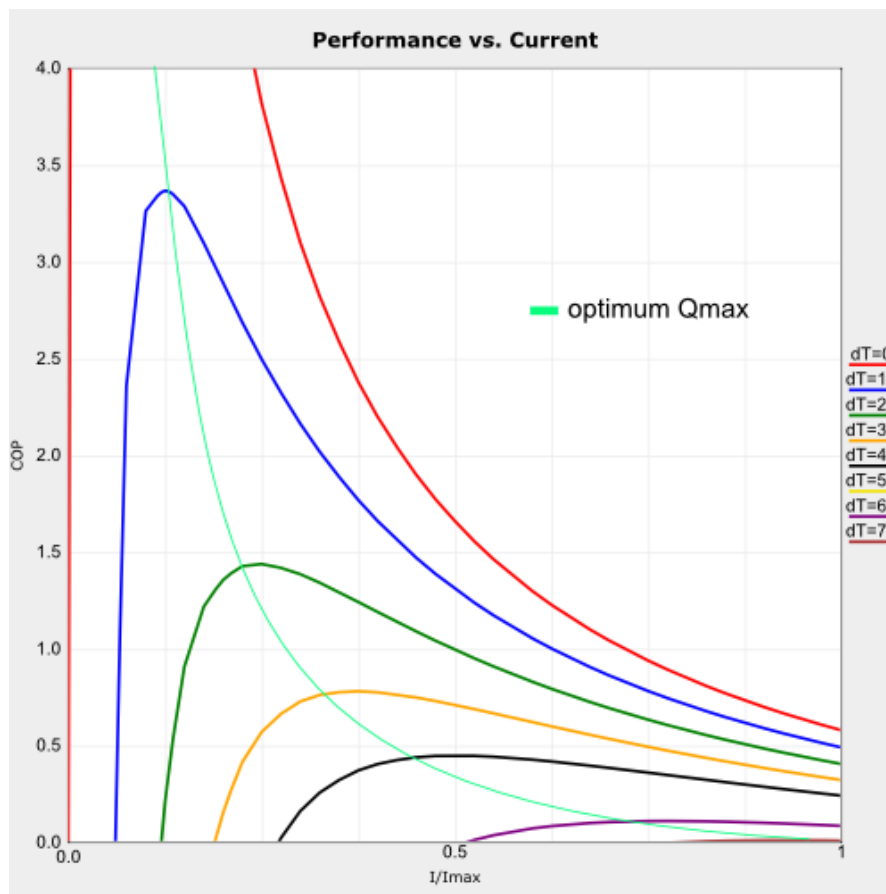


Obrázek 8 – přenesené teplo Pelt. článkem v poměru k napájecímu proudu ($dT = \Delta T$) [14]

Je tedy jasné, že pro nejvyšší účinnost musí být udržován rozdíl teplé a studené strany co nejnižší. Důležitý parametr při návrhu chlazení s Peltierovým článkem je koeficient výkonu, anglicky Coefficient of Performance (COP). Ten udává poměr přeneseného tepla článkem k elektrickému příkonu článku (rovnice 1).

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{P_{tot}} \quad 1$$

Čím vyšší je COP, tím méně odpadního tepla musí odvést chladič horké strany ($Q_c + P_{tot}$). Poměr koeficientu výkonu k napájecímu proudu při různých teplotách ΔT je možné spatřit na obrázku 9.



Obrázek 9 – účinnost přenosu tepla Pelt. článkem (zelená křivka – optimální účinnost; $dT = \Delta T$) [14]

Při chlazení lidské tkáně se vychází z požadavku chladit na teploty mezi -5 °C až $+10\text{ °C}$. Z toho vyplývá, že teplotní rozdíl studené a horké strany ΔT bude vždy nenulový. Je tedy nutné najít optimum mezi zvoleným příkonem článku a požadovaným odvodem tepla. V případě živé tkáně je před návrhem chlazení nutné vypočítat objem tepla, které tkáň odevzdává a které je nutné odvést skrze článek do chladicí kapaliny.

Z výše uvedeného je patrné, že Peltierovy články dosahují jen malé účinnosti. Pro zajímavost uvádím odkaz na experiment měření účinnosti chlazení. Při ochlazování 250 ml vody z teploty 18 °C na teplotu $14,5\text{ °C}$ byl poměr spotřebované elektrické energie vůči odvedené tepelné energii $n = \frac{P_e}{Q_c} = 0,02 = 2\%$. [17]

V tabulce Tabulka 1 je uveden přehled běžně používaných typů Peltierových článků. Některé z nich jsou dostupné k zakoupení v prodejnách GM electronic. K základním parametrům je doplněný výkon P_{max} , který je vypočten podle rovnice 2. Z předchozího textu vyplývá, že tento výkon odebírá článek při maximálním teplotním rozdílu ΔT_{max} , avšak při maximální teplotním rozdílu je přenášené teplo Q_c jen zlomkem maximální hodnoty Q_{max} . Je tedy patrné, že když článek odebírá výkon P_{max} , přenos tepla již nedosahuje hodnoty Q_{max} a klesá tedy efektivita přenosu. Také stoupá odpadní teplo odevzdané samotným článkem.

$$P_{max} = U_{max} \cdot I_{max}$$

2

Tabulka 1 – přehled parametrů vybraných článků [16]

Th = 30 °C	I _{max}	ΔT _{max}	U _{max}	Q _{max}	P _{max}
Typ článku	[A]	[°C]	[V]	[W]	[W]
TEC1-24103	3,3	67	28,8	55,6	95,04
TEC1-00704	4	66	0,82	1,8	3,28
TEC1-19904	4	67	23,4	55	93,60
TEC1-24104	4	67	28,8	56,9	115,20
TEC1-00705	5	66	0,82	2,3	4,10
TEC1-06305	5	66	7,43	22	37,15
TEC1-19905	5	67	23,4	66,6	117,00
TEC1-00706	6	66	0,82	1,6	4,92
TEC1-07106	6	66	8,4	28,7	50,40
TEC1-07906	6	66	9,3	33	55,80
TEC1-12706	6	67	15	51,4	90,00
TEC1-24106	6	67	28,8	101	172,80
TEC1-00707	7	66	0,82	2,7	5,74
TEC1-01707	7	66	2	8,1	14,00
TEC1-04907	7	66	5,78	24	40,46
TEC1-24107	7	66	28,8	118	201,60
TEC1-00708	8	66	0,82	3,7	6,56
TEC1-01708	8	66	2	9,2	16,00
TEC1-02308	8	66	2,83	12,8	22,64
TEC1-07108	8	66	8,4	38,5	67,20
TEC1-24108	8	66	28,8	129	230,40
TEC1-00710	10	66	0,82	4,8	8,20
TEC1-01710	10	66	2	11,5	20,00
TEC1-06310	10	66	7,43	41,9	74,30
TEC1-12710	10	66	15	85	150,00
TEC1-12712	12	64	15	95	180,00
TEC1-06309	9	66	7,43	37,7	66,87
TEC1-07109	9	66	8,4	42,5	75,60
TEC1-01708	8	66	2	9,5	16,00
TEC1-12708	8	66	15	69	120,00
TEC1-01710	10	66	2	11,5	20,00
TEC1-12710	10	66	15	85	150,00
TEC1-06312	12	64	7,43	50	89,16
TEC1-09412	12	64	11	75	132,00
TEC1-01714	14	66	2	15,8	28,00

TEC1-03114	14	66	3,66	28,8	51,24
TEC1-07114	14	66	8,4	65,9	117,60
TEC1-12714	14	66	15	118	210,00
TEC1-12715	15	66	15	127	225,00
TEC1-01718	18	65	2	20	36,00
TEC1-03118	18	65	3,66	36,6	65,88
TEC1-07118	18	65	8,4	83,8	151,20
TEC1-12718	18	65	15	150	270,00
TEC1-01720	20	65	2	22,6	40,00
TEC1-03120	20	65	3,66	41,2	73,20
TEC1-07120	20	65	8,4	94,4	168,00
TEC1-12720	20	65	15	169	300,00
TEC1-01730	30	65	2	34	60,00
TEC1-03130	30	65	3,66	64,2	109,80
TEC1-07130	30	65	8,4	145	252,00

3.2 Shrnutí rozboru

Účinnost přenosu tepla pomocí Peltierových článků není vysoká a je silně závislá na udržovaném teplotním rozdílu. To se jeví jako největší nevýhoda v porovnání s jinými systémy, např. s kompresorem. Oproti nim však může dosahovat mnohem menších chladicích výkonů, kdy není zbytečně naddimenzovaný. To znamená i úsporu energie oproti velkému systému s kompresorem.

Další výhodou Peltierových článků jsou malé rozměry samotného chladicího prvku. K odvodu tepla dochází na ploše o velikosti maximálně jednotek cm^2 . Také díky tomu je systém s těmito prvky snadno přenositelný, a pokud je to nutné, lze jej i napájet z baterie. Jako příklad je možné uvést různé autochladničky pro pobyty v přírodě.

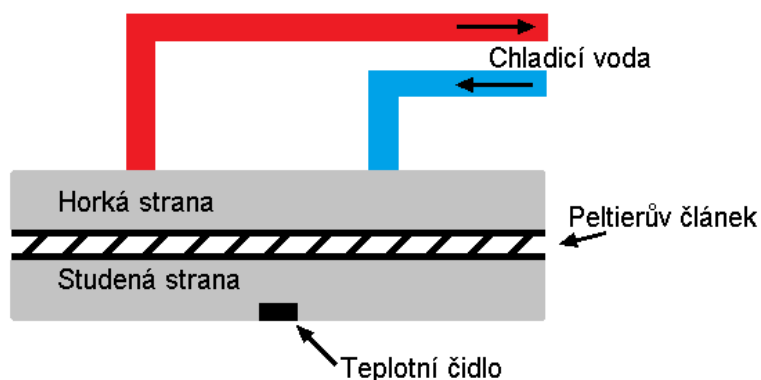
4. Návrh regulace

Čelý systém se skládá z několika prvků. Základna obsahuje zásobník chladicí vody, vodní chladič s ventilátory, vodní čerpadlo a zdroj napětí pro tyto prvky. K základně se pak pomocí hybridních konektorů připojují chladicí hlavice. V současné době jsou vyrobeny dvě testovací hlavice, bodová (Obrázek 43) a plošná (Obrázek 10).



Obrázek 10 – plošná chladicí hlavice

Hlavice obsahuje Peltierův článek. Studená strana je tepelně spojena s hliníkovou hlavicí a horká strana je tepelně spojena s vodním chladičem. Teplotní čidlo je umístěno na rozhraní chladicí plochy a přikládáné tkáně pro zajištění co nejmenší chyby měření. Principiální schéma je na 11. Chladicí voda odvádí teplo pryč pro udržení optimálního rozdílu ΔT .



Obrázek 11 – principiální schéma chladicí hlavice

V tomto systému byla dříve používána hysterezní regulace s reléovým výstupem. Tento způsob měl některé nedostatky, zejména teplota článku kolísala ve velkém intervalu, až o 10 °C. Důvodem tohoto

kolísání je princip Peltierova článku. V okamžiku vypnutí napájecího proudu se článek stává vodičem tepla. Teplo odvedené do chladicí vody (která má při provozu teplotu kolem 30 až 40 °C) se přes článek vede zpět na chladicí hlavici. Při opětovném sepnutí napájecího proudu pak musí článek napřed odvést toto teplo zpět do chladicí vody a teprve poté začíná odvádět teplo z tkáně.

Cílem řídicího systému tedy je, aby nedocházelo k úplnému vypínání článku, ale pouze snížení chladicího výkonu. Toto je zajištěno pomocí pulzně-šířkové modulace. Ideální způsob regulace by byl pomocí PID regulátoru, který by reagoval plynulým nastavováním střídy PWM. Bylo by však nutné změřit nebo experimentálně zvolit koeficienty jednotlivých parametrů regulátoru. Pro tento systém by to znamenalo náročné měření, případně dlouhé testování.

Byl tedy zvolen způsob regulace na hranici hysterezní a proporcionální regulace. Mezi zapnuté a vypnuté výkonové stupně byly přidány ještě dva další snížené stupně, které pomocí PWM zajišťují snížený proud chladicím článkem. Po vychlazení na žádanou teplotu se pomocí PWM sníží výkon článku. Pokud teplota dále klesne o určitou hodnotu, výkon se sníží ještě více. Teprve po dosažení další hodnoty hystereze se článek úplně vypne. Podrobnější popis regulační funkce je uveden v kapitole 4.5 Ovládání systému.

Tato regulační funkce se stala základem navrhovaného systému. Při projektování byl zadán požadavek na obsluhu nejvýše 4 chladicích hlavíc současně. V budoucnu bude možné k systému připojit 4 hlavice, které budou chladit celý kolenní kloub koně.

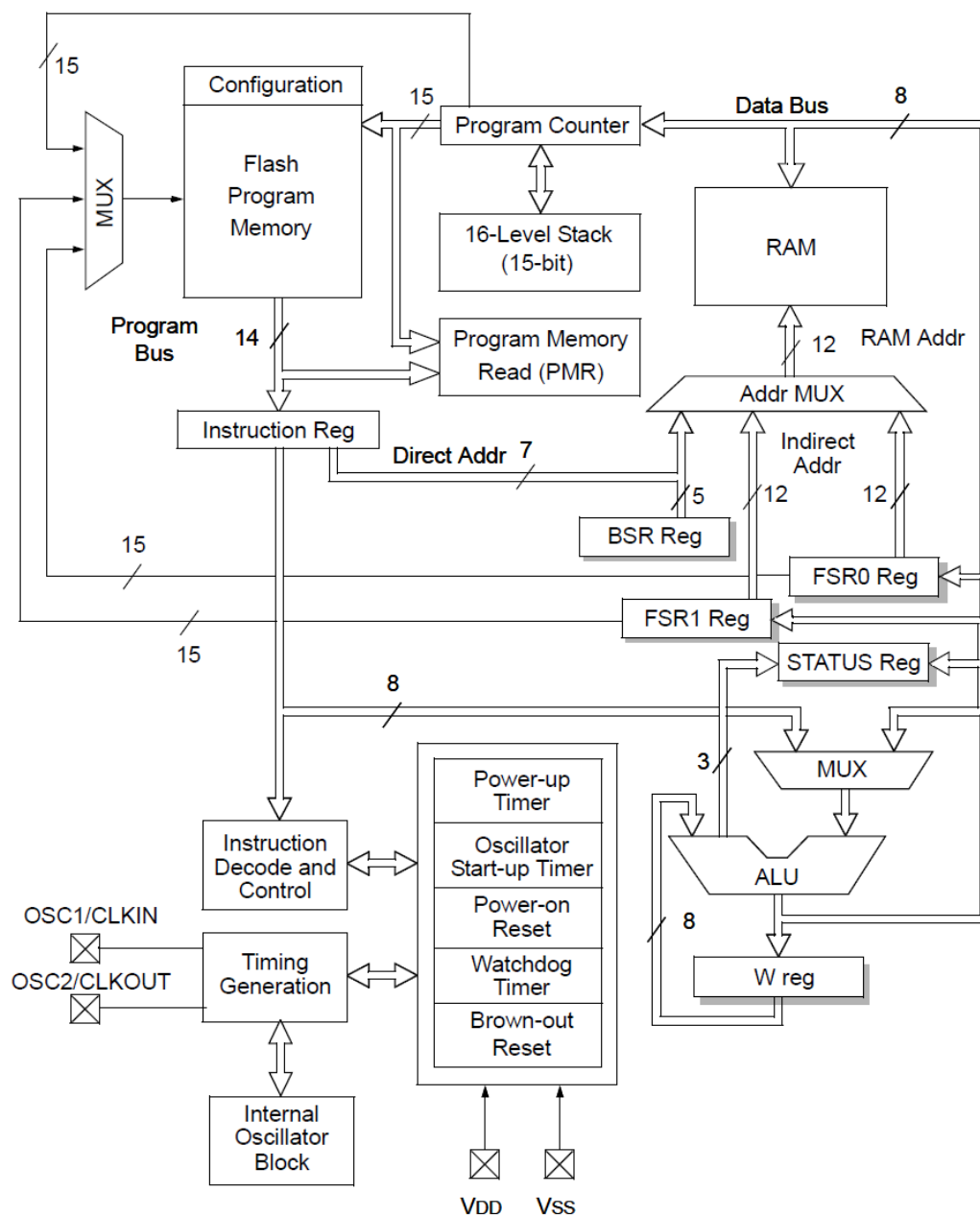
Po prostudování jednotlivých požadavků se jako nejvhodnější platforma jevil 8bitový mikropočítač naprogramovaný pro tento konkrétní účel. Regulaci je nutno řešit jako real-time aplikaci, kde různé přípravy s operačními systémy (jakou jsou např. Arduino, RaspBerry Pi, a další.) selhávají. K realizaci byl zvolen mikropočítač od výrobce Microchip, typ PIC16F1518.

4.1 Popis použitého mikropočítače

4.1.1 Základní parametry

Parametry jsou převzaté z katalogového listu [1]. Jedná se o 28pinový mikrokontrolér s RISC architekturou. Instrukční soubor a jádro má přizpůsobené pro kompilery jazyka C. Disponuje pamětí programu 28 KB a pamětí SRAM o velikosti 1 KB.

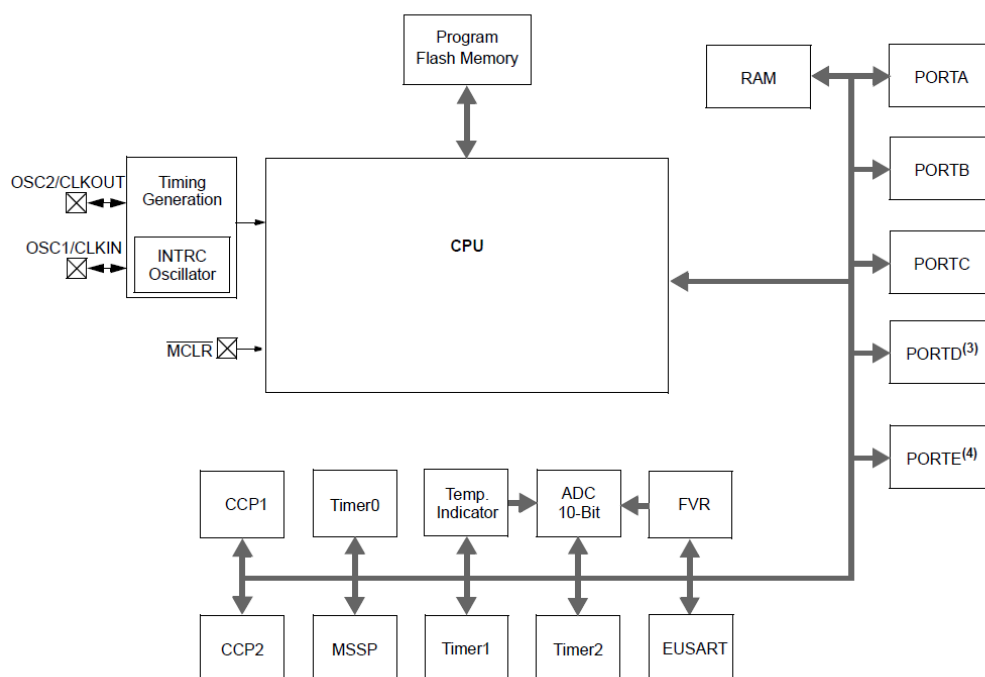
Mezi další periferie patří interní oscilátor až 16 MHz, dva 8bitové čítače, jeden 16bitový čítač, modul PWM, UART a další. Mikropočítač také obsahuje četné analogové periferie, které však v této práci nejsou použity a proto nebudou předmětem popisu. Jako velkou výhodu uvádím zatížitelnost vstupně/výstupních pinů, které lze zatížit proudem až 25 mA (a to jak ve stavu log. 0, tak ve stavu log. 1).



Obrázek 12 - blokové schéma jádra mikropočítače [1]

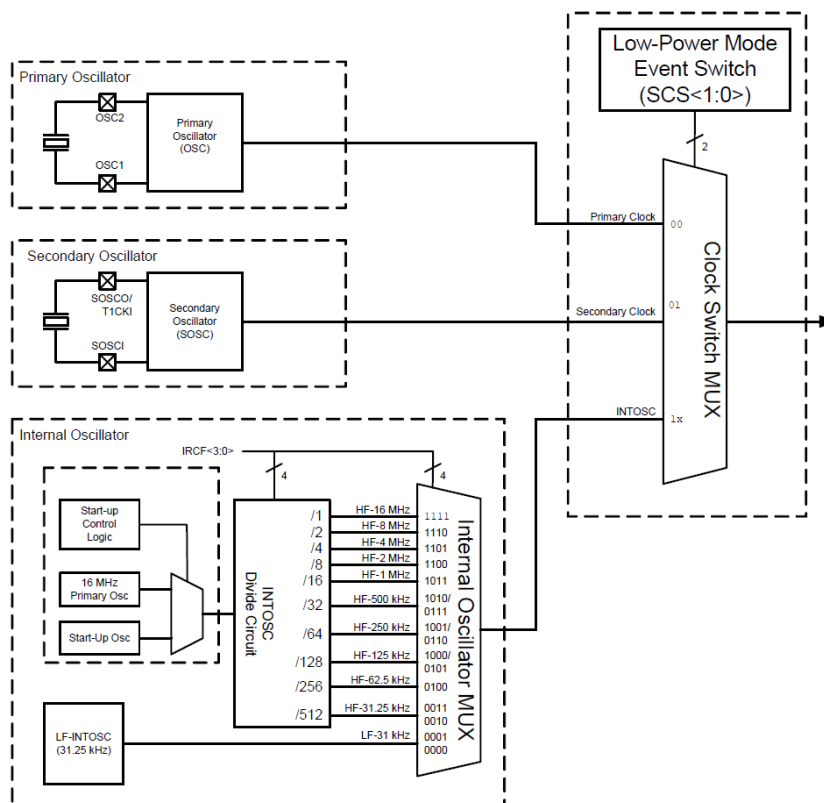
Jádro mikropočítače je z rodiny „enhanced mid-range 8-bit“, tedy vyšší střední třídy. Přerušovací systém zajišťuje automatické ukládání systémových registrů, datová paměť umožňuje přímé, nepřímé a relativní adresování. Zásobník pro práci s podprogramy má 16 úrovní. Jádro je optimalizováno pro programování v jazyce C.

Na obrázku 13 vidíme všechny periferie, kterými mikropočítač PIC16F1518 disponuje. V popisu jednotlivých periférií uvedu ty, které byly použity pro potřeby této práce.



Obrázek 13 – blokové schéma periférií mikropočítače [1]

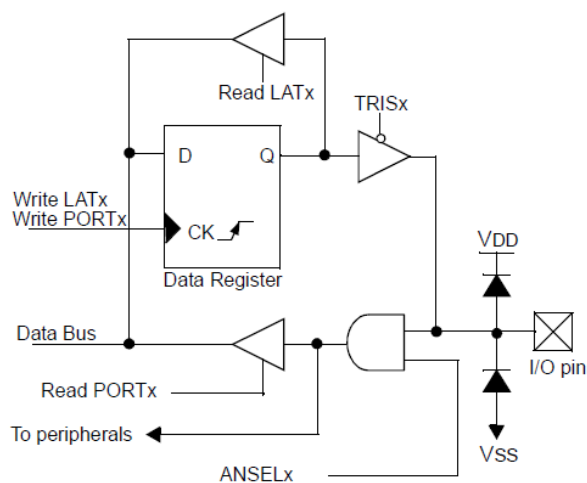
4.1.2 Vnitřní oscilátor



Obrázek 14 – blokové schéma oscilátoru mikropočítače [1]

Blokové schéma generátoru hodinového signálu je na obrázku 14. Mikropočítač umožňuje taktování pomocí externího oscilátoru, např. s krystalovým rezonátorem, ale také obsahuje vnitřní oscilátor s dobrými parametry. Protože v této aplikaci není potřeba udržovat přesný čas, pro ušetření dvou vstupně-výstupních pinů byl zvolen interní oscilátor. Je nastaven na nejvyšší frekvenci, tedy 16 MHz. Zařízení není napájené z baterie a spotřeba oscilátoru není hlídáný parametr. Spotřeba mikropočítače je přímo závislá na taktovací frekvenci.

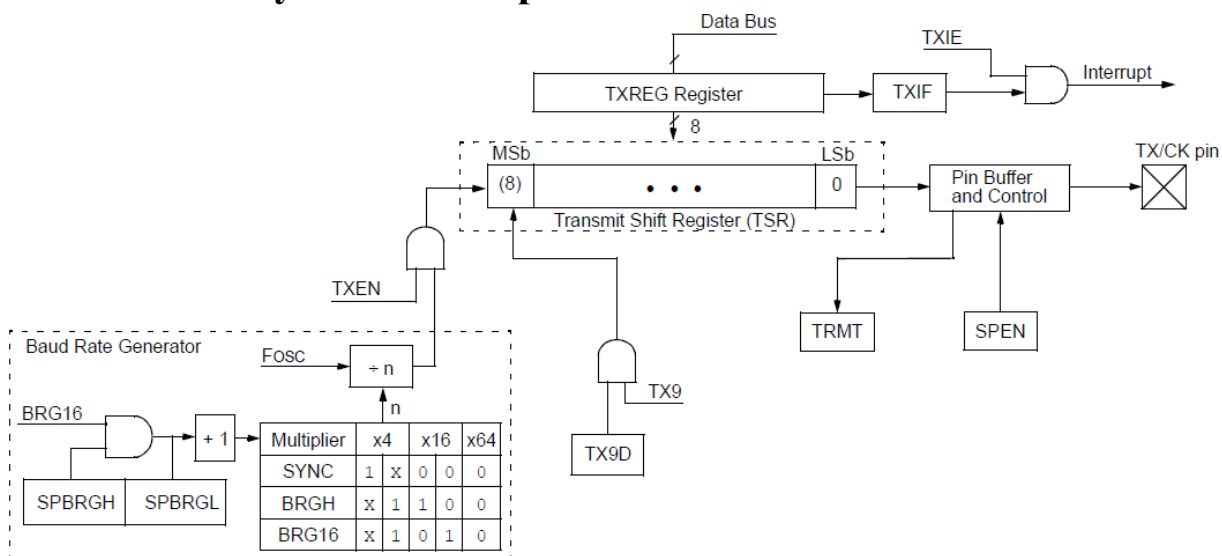
4.1.3 Vstupně výstupní porty



Obrázek 15 – principiální schéma jednoho pinu mikropočítače [1]

Standardní zapojení jednoho vstupně-výstupního pinu je na obrázku 15. U typu PIC16F1518 jsou k dispozici celkem 4 porty: A, B, C a E. V aplikaci jsou využity téměř všechny piny, u některých je funkce sdílená. Jednotlivé nastavení na vstup nebo výstup je patrné ze schématu. Zatížitelnost každého pinu nastaveného jako výstup je maximálně 50 mA, přičemž zatížitelnost napájecího pinu Vdd je 250 mA, a pinu Vss je 350 mA.

4.1.5 Modul asynchronního portu EUSART



Obrázek 17 – blokové schéma vysílacího modulu EUSART [1]

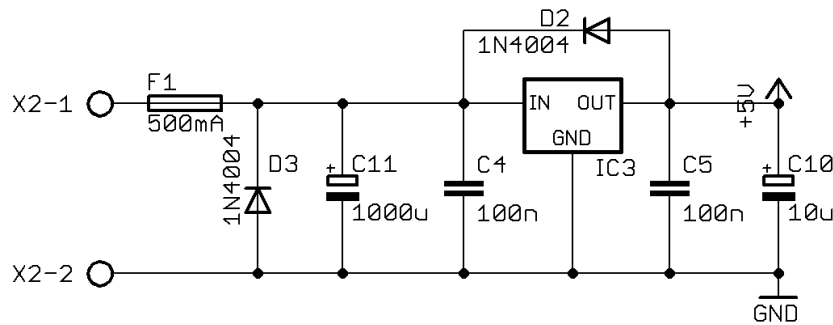
Pro komunikaci s okolím je využíván modul univerzálního asynchronního vysílače a přijímače. Skládá se ze dvou modulů – vysílače a přijímače. V aplikaci je nastaven na běžný způsob komunikace – asynchronní režim, rychlost 9600 Bd, 8 datových bitů, bez parity a 1 stop bit.

4.2 Schéma zapojení

Celý systém se skládá ze dvou desek. Z desky řídicí, kde je umístěn mikropočítač a všechny potřebné obvody pro nastavování a indikaci stavu, a z desky spínací, na níž se nachází pouze výkonové tranzistory společně s jejich budičem a chladičem. Obě desky jsou od sebe navzájem galvanicky odděleny optočleny a mohou být napájeny z různých zdrojů. Optočleny jsou umístěny na desce řídicí. Kompletní schéma zapojení obou desek je obsaženo v příloze této práce.

4.2.1 Řídicí deska

Obvod napájení řídicí desky tvoří stabilizátor typu 7805 v běžném zapojení s ochrannými diodami, viz obrázek 18. Ochrana proti přepólování je řešena diodou v závěrném směru na vstupu napájení. V případě otočení polaritý dojde k přepálení pojistky. Pojistka je zde v uzavřeném provedení s možností vyměnění pájením. Proudová rezerva je dostatečná a k přepálení pojistky dojde pouze v případě přepólování.



Obrázek 18 – napájecí obvod řídicí desky

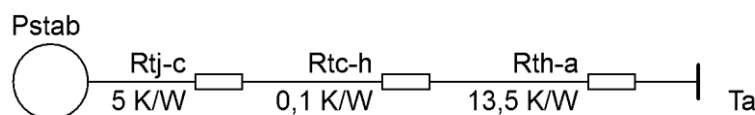
Na vstupu desky je napájecí napětí 12 V. Použitý stabilizátor je lineární, při návrhu bylo nutné vypočítat výkonovou ztrátu stabilizátoru. Napřed byla proudová spotřeba desky teoreticky vypočtena součtem spotřeby všech důležitých součástek (např. podsvětlení displeje, LED optočlenů, pull-up rezistory tlačítek, ...). Tato hodnota byla následně experimentálně ověřena na kontaktním poli. Výsledná proudová spotřeba kompletní desky se pohybuje kolem 200 až 250 mA. Výkonová ztráta na stabilizátoru je vypočtena v (3).

$$P_{stab} = (U_{in} - U_{out}) \cdot I_{cc} = (12 - 5) \cdot 0,25 = 1,75 \text{ W} \quad 3$$

Protože ztráta není zanedbatelná, stabilizátor musí být umístěn na chladiči. Byl zvolen typ V4330N dostupný v GME (Obrázek 20). Podle katalogového listu [2] má tepelný odpor chladič – okolí $R_{th-a} = 13,5 \text{ K/W}$. Tepelný odpor přechodu pouzdro – chladič (R_{tc-h}) zvolíme zanedbatelnou hodnotu, protože je použita teplovodivá pasta. Tepelný odpor přechodu polovodič – pouzdro (R_{tj-c}) byl převzat z katalogového listu stabilizátoru [3]. Náhradní tepelné schéma stabilizátoru je na obrázku 19. Teplota okolí byla pro výpočet zvolena $T_a = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, pro vytvoření rezervy a také s přihlédnutím k podmínkám v cílové aplikaci. Teplota přechodu $T_j \doteq 63 \text{ }^\circ\text{C}$ (podle rovnice 4). Maximální teplota čipu 7805 je $T_{jmax} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$. S rezervou je dodržena. Pro informaci je též v (5) vypočítána teplota na povrchu chladiče stabilizátoru.

$$\begin{aligned} T_j &= (P_{stab} \cdot (R_{tj-c} + R_{tc-h} + R_{th-a})) + T_a \\ &= (1,75 \cdot (5 + 0,1 + 13,5)) + 30 = 62,55 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad 4$$

$$T_h = (P_{stab} \cdot R_{th-a}) + T_a = (1,75 \cdot 13,5) + 30 = 53,625 \text{ }^\circ\text{C} \quad 5$$



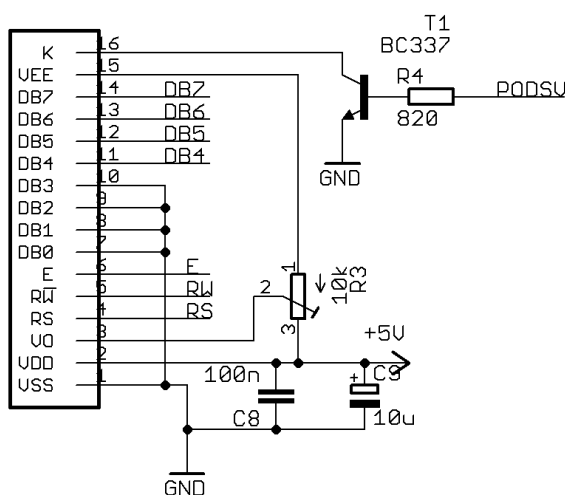
Obrázek 19 – náhradní tepelné schéma stabilizátoru



Obrázek 20 – chladič V4330N [20]

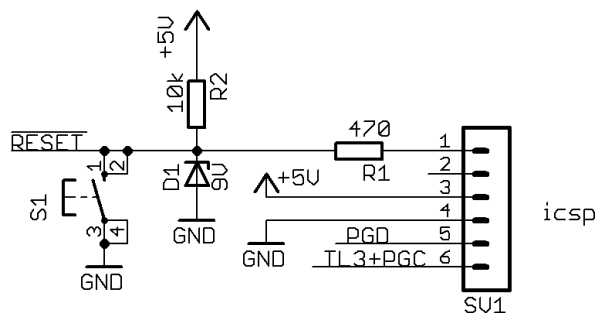
Alfanumerický displej je připojen k procesoru pomocí 4bitové varianty sběrnice podle datasheetu výrobce displeje [4], viz obrázek 21. Trimr R3 slouží k regulaci kontrastu displeje. Podsvícení displeje je napájeno přes tranzistor T1 připojený k mikropočítači. Výpočet předřadného rezistoru R4 v bázi tranzistoru je v rovnici 6. Výsledkem výpočtu není odpor nacházející se v rezistorové řadě, byl tedy zvolen rezistor s nejbližším vyšším odporem (820 Ω). U_{OH} je výstupní napětí portu v úrovni log. 1. Tranzistor je běžný spínací NPN tranzistor s průměrným zesilovacím činitelem h_{21e} kolem 100. Proud bázi je nastaven záměrně vyšší pro ponechání případné rezervy při odchylce zesilovacího činitele. V budoucnu je možné úpravou programu vypínat podsvícení displeje při nečinnosti.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_{OH} - U_{BE}}{I_B} = \frac{4,3 - 0,7}{0,005} = 720 \, \Omega \quad 6$$



Obrázek 21 – připojení alfanumerického displeje

Pro nastavování jsou připravena tři tlačítka zapojená jako aktivní v nule s pull-up rezistory. Velikost pull-up rezistorů je 1 kΩ. Tato hodnota byla zvolena jako kompromis mezi spotřebou proudu a odolností proti rušení. Jedno tlačítko užívá pin sdílený pro účely programování mikropočítače.



Obrázek 22 – připojení programovacích přípravků

Programování mikropočítače je zajištěno pomocí rozhraní ICSP (In-circuit serial programming). Výřez schématu je na obrázku 22. Výrobce nedovoluje na programovacím pinu napětí vyšší než 9 V. Mnoho programovacích přípravků však používá napětí 13 V. Bylo tedy nutné vytvořit ochranné zapojení se Zenerovou diodou, které omezí programovací napětí na povolenou hodnotu. Výpočet rezistoru R1 pro proud Zenerovou diodou je v rovnici 7. Pin procesoru pro programovací napětí je za běhu programu používán pro případný reset a je k němu připojeno tlačítko umístěné přímo na desce plošného spoje.

$$R = \frac{U_{PROG} - U_Z}{I_Z} = \frac{13 - 9}{0,01} = 400 \, \Omega$$

7

(U_{PROG} – výstupní napětí programovacího přípravku)

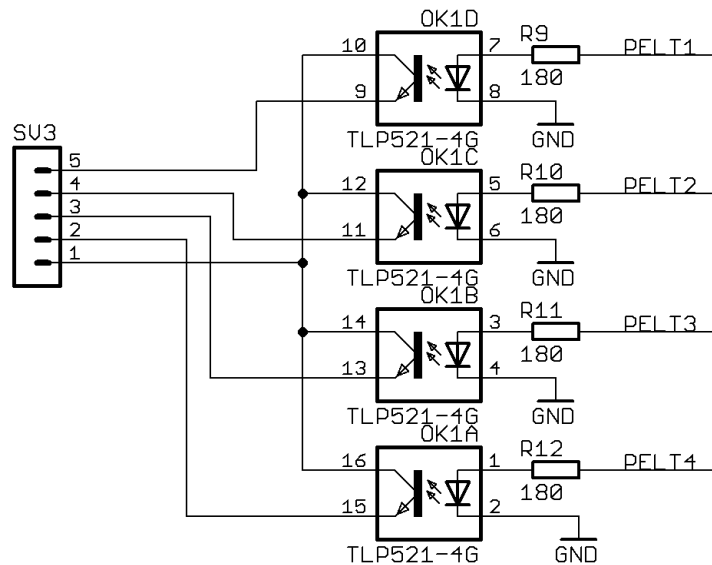
Pro jednoduchou indikaci provozu chladicích článků jsou vedle alfanumerického displeje umístěny 4 červené světelné diody. Tyto LED jsou připojeny přímo k pinům mikropočítače, a to v režimu „aktivní v nule“ – při úrovni log. 0 na výstupu procesoru dioda svítí. Jako předřadné rezistory byly použity takové z rezistorové řady, jejichž odpor je nejbližší výsledné hodnotě z následujícího výpočtu:

$$R = \frac{U_{OH} - U_F}{I_F} = \frac{4,3 - 1,6}{0,01} = 270 \, \Omega$$

8

Možnost připojení k ostatním zařízením pomocí sériové linky zajišťuje převodník napětíových úrovní pro sběrnici RS-232. Sběrnice je vyvedena na běžný konektor Cannon 9 – v provedení samice.

Protože spínací deska pracuje s proudy o velikosti desítek A, je nutné oddělit logickou část systému od výkonové části. V případě galvanického spojení by mohlo vzniklé rušení způsobit problémy při provozu mikropočítače. Z těchto důvodů je výstup na spínací desku oddělen optočleny. Je použit čtyřnásobný optočlen typu TLP521 obsahující čtyři oddělovače v jednom pouzdře. LED v optočlenu spíná přímo výstup z mikropočítače přes předřadný odpor vypočtený v 9. Parametry optočlenu jsou převzaty z příslušného katalogového listu [5]. Pro zvolený rezistor o hodnotě 180 Ω poteče LED optočlenu proud přibližně 17 mA (10). Pro tento proud diody je výstupní tranzistor v saturaci pro velký rozsah proudů I_C . Zapojení optočlenů na řídicí desce je na obrázku 23.



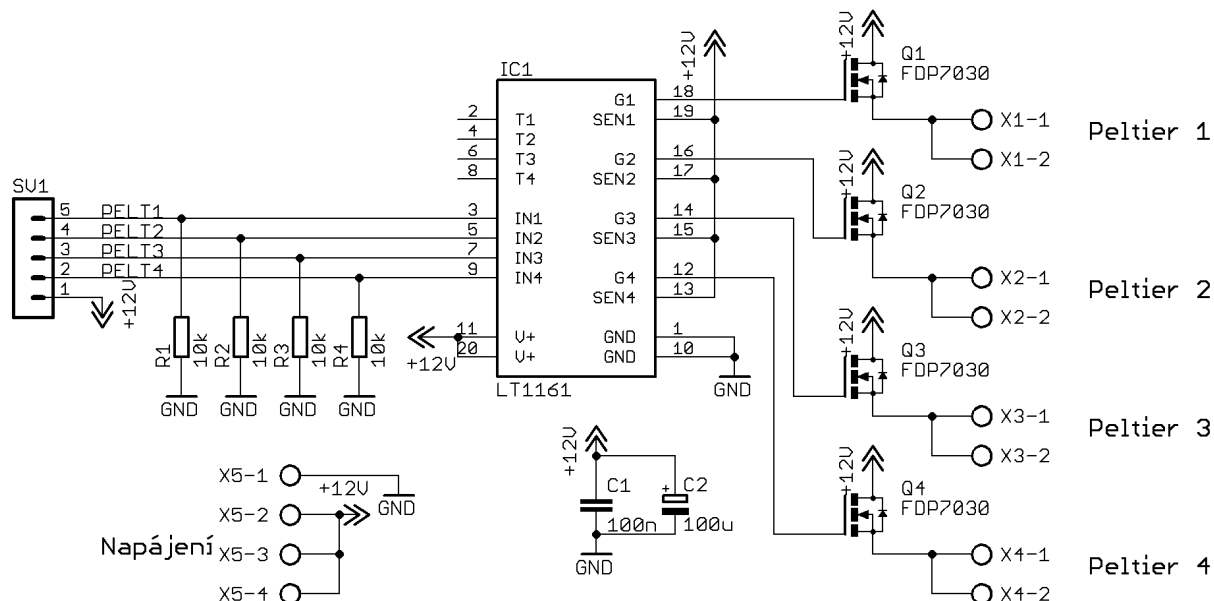
Obrázek 23 – připojení oddělovacích optočlenů na straně řídicí desky

$$R = \frac{U_{OH} - U_F}{I_F} = \frac{4,3 - 1,15}{0,02} = 157,5 \, \Omega \quad 9$$

$$I_F = \frac{U_{OH} - U_F}{R} = \frac{4,3 - 1,15}{180} \doteq 17 \, \text{mA} \quad 10$$

4.2.2 Spínací deska

Schéma zapojení desky je velice jednoduché a sestává pouze z budiče a samotných tranzistorů. Budičem je zde integrovaný obvod LT1161 od výrobce Linear Technology [6]. Obsahuje čtyři samostatné budiče N-kanálových MOSFET pro zapojení v horní části, tzv. high-side. Disponuje také funkcí nadproudové ochrany, která je však v tomto systému neaktivní. Kvůli zamezení pronikání rušení je budič oddělen od řídicí desky optočleny. Pro lepší rozložení zatížení svorkovnice je každý výstup připojen na dvě svorky. V případě výstupních proudů vyšších než 10 A by měly být obě svorky každého výstupu použity současně.



Obrázek 24 – schéma zapojení spínací desky

Použité tranzistory N-MOSFET jsou typu FDP7030. Maximální proud I_D je 60 A, nejvyšší povolené napětí U_{DS} je 30 V. Výrobce v [19] udává $R_{DS(ON)} = 9 \text{ m}\Omega$ při $U_{GS} = 10 \text{ V}$, které bude dodrženo díky nábojové pumpě v budicím obvodu LT1161. Při návrhu chlazení bylo vycházeno z požadavku na sepnutí výkonného Peltierova článku s proudem 20 A. Tepelné schéma soustavy viz obrázek 26. Pro tento proud je výkonová ztráta jednoho tranzistoru 3,6 W (11). Nejméně výhodný případ je pro všechny tranzistory zatížené tímto ztrátovým výkonem najednou, tedy $P_{TOT} = 14,4 \text{ W}$. Tato ztráta se přemění v odpadní teplo odvedené chladičem.

Výrobce tranzistoru udává maximální teplotu přechodu $T_{jMAX} = 170 \text{ }^\circ\text{C}$. V praxi není vhodné tepelně namáhat polovodiče tak vysokou teplotou, jako mezní teplota pro výpočet byla zvolena hodnota $T_{jMAX} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Odvod tepla z tranzistorů na chladič je vylepšen teplovodivou pastou, přechod tranzistor – chladič zanedbáme hodnotou $R_{ic-h} = 0,1 \text{ K/W}$. Výrobce udávaný tepelný odpor přechodu polovodič – pouzdro je $R_{tj-c} = 2,5 \text{ K/W}$. Pro dostatečnou rezervu nastavíme $T_a = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Maximální teplotní spád chladič – vzduch je zbytek do T_{jMAX} po odečtení teplotního spádu na odporu přechod – pouzdro (12). Nyní ze známých hodnot P_{TOT} a ΔT_{h-aMAX} vypočteme maximální tepelný odpor chladiče (13), jehož hodnota byla vypočtena $R_{th-aMAX} \doteq 4,4 \text{ K/W}$.



Obrázek 25 – chladič CHL20B [20]

Jako nejvhodnější se jevil chladič typu CHL20B [7]. Tepelný odpor chladiče je $R_{th-a} = 1,8 \text{ K/W}$. Pro informaci byl proveden výpočet maximální ztrátového výkonu P_{TOT} při použití daného chladiče. Přepočtené schéma tepelných odporů je na obrázku 27. Podle rovnice 14 je maximální hodnota ztrátového výkonu $P_{TOTMAX} \doteq 37 \text{ W}$. Ztráta jednoho tranzistoru je tedy $P_{1MAX} \doteq 9 \text{ W}$. Na základě tohoto údaje je možné vypočítat maximální proud při zadaném $R_{DS(ON)}$. Maximální dovolený proud jedním tranzistorem je $I_{DMAX} = 32 \text{ A}$ (viz 15).

$$P_1 = R_{DS(ON)} \cdot I_D^2 = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 20^2 = 3,6 \text{ W} \quad 11$$

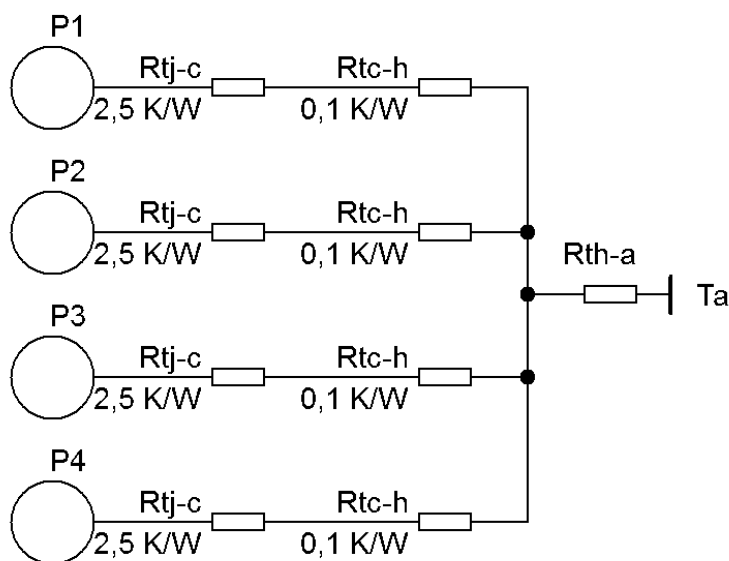
$$\Delta T_{h-aMAX} = T_{jMAX} - \left(4P_1 \cdot (R_{tj-c} + R_{tc-h}) \right) = 100 - 37,44 \quad 12$$

$$\doteq 63 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{th-aMAX} = \frac{\Delta T_{h-aMAX}}{P_{TOT}} = \frac{63}{14,4} \doteq 4,4 \text{ K/W} \quad 13$$

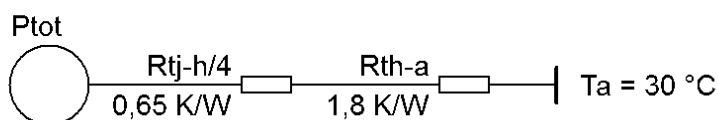
$$P_{TOTMAX} = \frac{T_{jMAX} - T_a}{\frac{R_{tj-c}}{4} + R_{th-a}} = \frac{120 - 30}{0,65 + 1,8} \doteq 37 \text{ W} \quad 14$$

$$I_{DMAX} = \sqrt{\frac{P_{1MAX}}{R_{DS(ON)}}} = \sqrt{\frac{9}{9 \cdot 10^{-3}}} \doteq 32 \text{ A} \quad 15$$



Obrázek 26 – tepelné schéma spínacích tranzistorů

$$T_{j\max} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$$

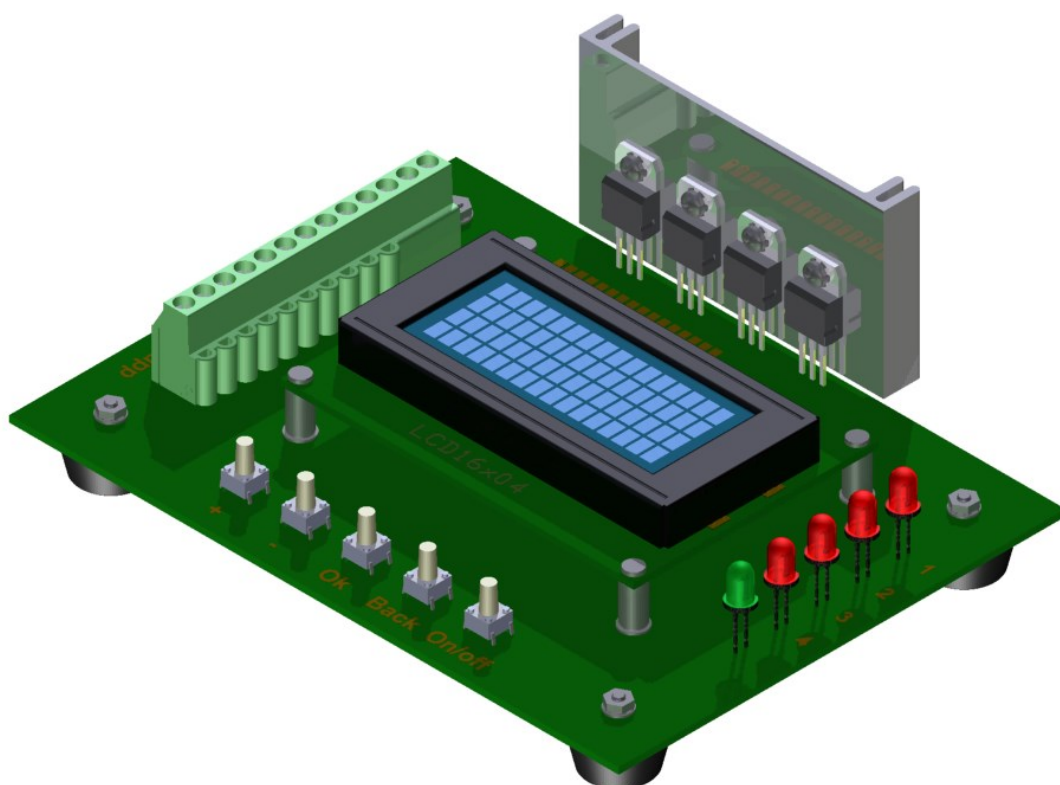


Obrázek 27 – přepočtené tepelné schéma pro výpočet maximálního ztrátového výkonu P_{tot}

4.3 Mechanické provedení

4.3.1 Řídicí deska

Na fyzickou realizaci nebyly vzneseny žádné speciální požadavky. Bylo nutné na řídicí desku umístit všechny potřebné součástky a využít prostor efektivně. Rozmístění součástek se odvíjel od umístění největší součástky – alfanumerického displeje. Ten byl umístěn nad desku pomocí distančních šroubů. Vedle displeje jsou umístěny LED indikující činnost jednotlivých chladicích článků. Na desce v prostoru pod displejem se nachází mikropočítač a další drobné součástky. Prvotní návrh vzhledu desky je na následujícím obrázku 28.

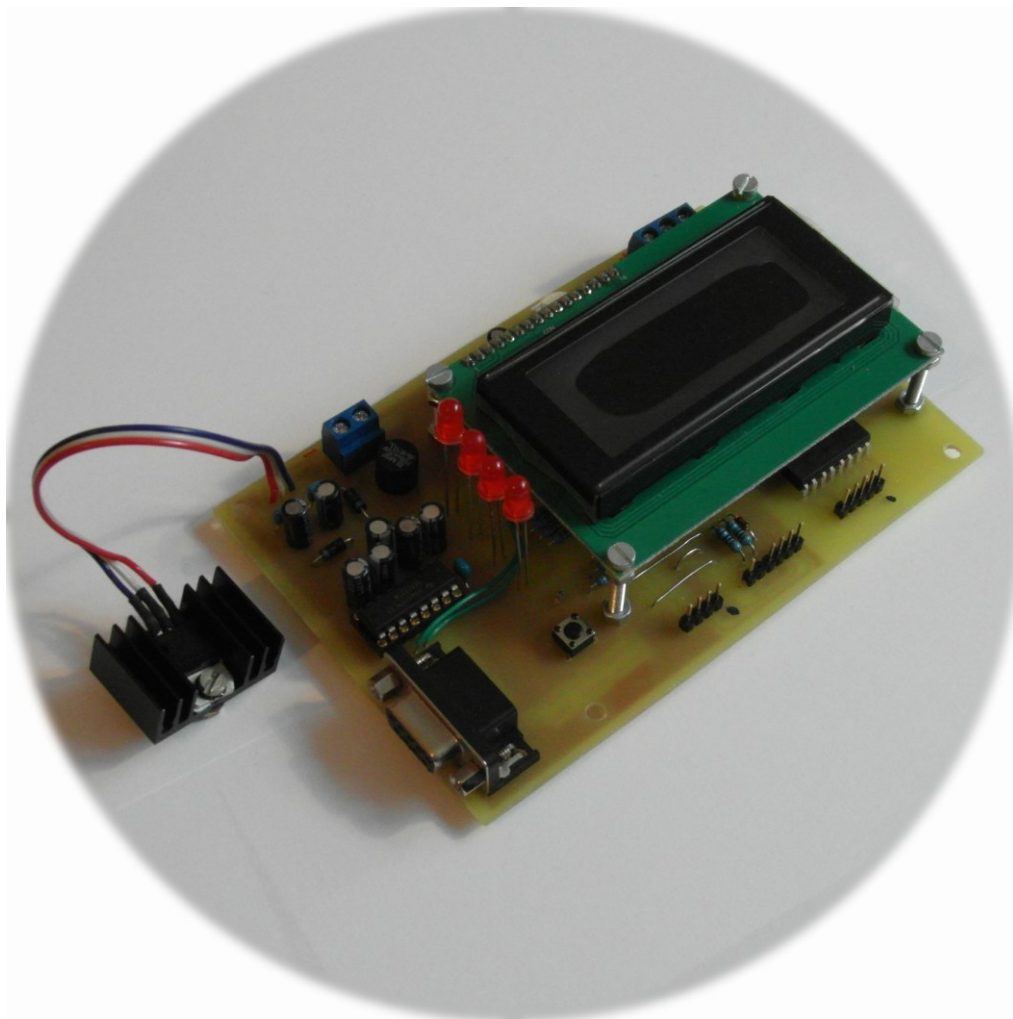


Obrázek 28 – prvotní návrh řídicí desky

Výsledný návrh desky je od prvotního odlišný. Realizovaný návrh desky můžeme vidět na obrázku 29. V původním konceptu bylo počítáno s umístěním spínacích tranzistorů přímo na desku s mikropočítačem. Po úvaze všech zdrojů rušení bylo rozhodnuto o fyzickém oddělení spínací a řídicí části a následně o jejich galvanickém oddělení. Desky jsou propojeny plochým kabelem. Do systému byl dále zakomponován požadavek na komunikaci s okolím pomocí sběrnice RS-232. Převodník napěťových úrovní a konektor je umístěn v levé části desky. Desku je možné připevnit do krabičky nebo řídicí skříně systému pomocí čtyř šroubů.

Tlačítka byla také z desky vypuštěna a je možné je připojit plochým kabelem, z důvodu snadnějšího umístění do panelu. Tlačítka jsou celkem tři a počítá se s jejich polohou pod displejem tak, aby jejich funkce mohla být vypsána na spodním řádku displeje.

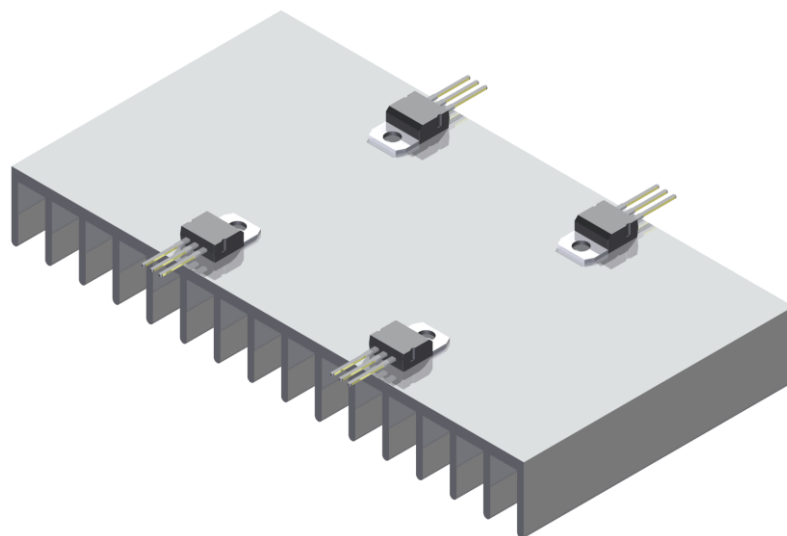
Na desce jsou dva ovládací prvky. Trimr pro změnu kontrastu displeje a tlačítko Reset. Trimr je umístěn tak, aby se dal jednoduše ovládat i přes případný panel. Reset tlačítko slouží pro testování a ladění programu, případně pro restartování systému v případě nesprávné funkce programu.



Obrázek 29 – výsledné provedení řídicí desky

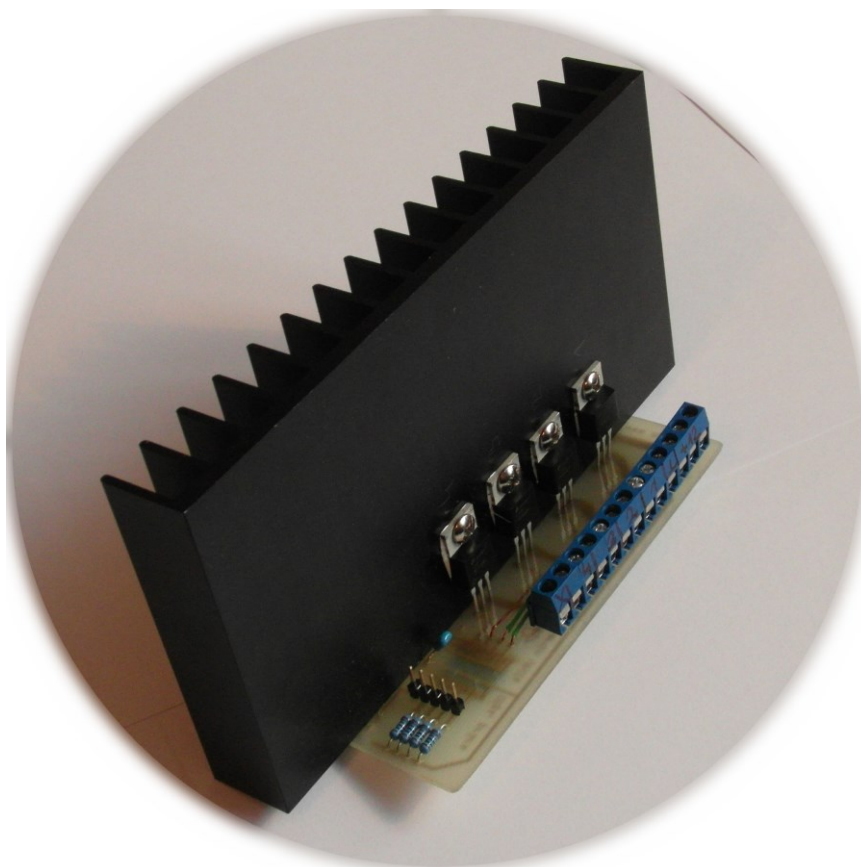
4.3.2 Spínací deska

Spínací deska má velmi malé rozměry a je samotná připevněna ke hliníkovému chladiči. Umístění tranzistoru je v tomto případě vybráno jako kompromis mezi velikostí desky a účinností chlazení. Pro lepší odvod tepla ze všech zatížených tranzistorů by bylo vhodnější umístit tranzistory do rohových kvadrantů chladiče (Obrázek 30). V tomto případě by musela být deska rozdělena na dvě, nebo by k tranzistorům musely vést drátové spoje. Pro uvažované proudy je toto řešení nepraktické.



Obrázek 30 – možné řešení pro optimální odvod tepla tranzistorů

Tranzistory jsou tedy umístěny vedle sebe. Při maximálním zatížení budou vnitřní tranzistory chlazené hůře než tranzistory vnější, avšak ve výpočtech je toto zohledněno nastavením nižší teploty přechodu T_{jMAX} . V praxi je také málo pravděpodobné zatížení všech tranzistorů maximálním proudem $I_{DMAX} = 32\text{ A}$. Pohled na vyrobenou desku s tranzistory připevněnými ke chladiči je na následujícím obrázku 31.



Obrázek 31 – spínací deska s chladičem tranzistorů

Protože se předpokládá namáhání extrémním proudem, byly vodivé cesty na desce posíleny měděným vodičem. Při provozu v těchto podmínkách se předpokládá zahřívání zejména vodivých cest a svorkovnic.

Průřez vodičů desky byl zesílen připájením měděného vodiče průřezu $1,5 \text{ mm}^2$ mezi tranzistory a svorkovnice a průřezu $2,5 \text{ mm}^2$ na hlavní rozváděcí cestu. Podle [18] je tavný proud měděného vodiče o průřezu $1,5 \text{ mm}^2$ podle rovnice 17 roven 50 A. Tavný proud měděného vodiče průřezu $2,5 \text{ mm}^2$ je podle rovnice 17 přibližně 67 A. Uvažovaný maximální proud dosahuje poloviny tohoto vypočítaného proudu, v případě sepnutí všech tranzistorů by došlo k překročení této hodnoty u společného vodiče. Je tedy nutné uvažovat s oteplením těchto vodičů, které může být značné.

Také je nutno uvažovat maximální proud svorkovnic, který je dle výrobce 16 A pro jednu svorku. V případě větší zátěže by bylo nutné propojit dvě výstupní svorky. Při těchto proudech bude docházet k zahřívání celé desky a je tedy nutné poznamenat, že doporučený proud zatížení je max. 20 A.

$$I_{tav} = m \sqrt{\left(\sqrt{\frac{S}{\pi}}\right)^3} = 80 \cdot \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1,5}{\pi}}\right)^3} \doteq 50 \text{ A} \quad 16$$

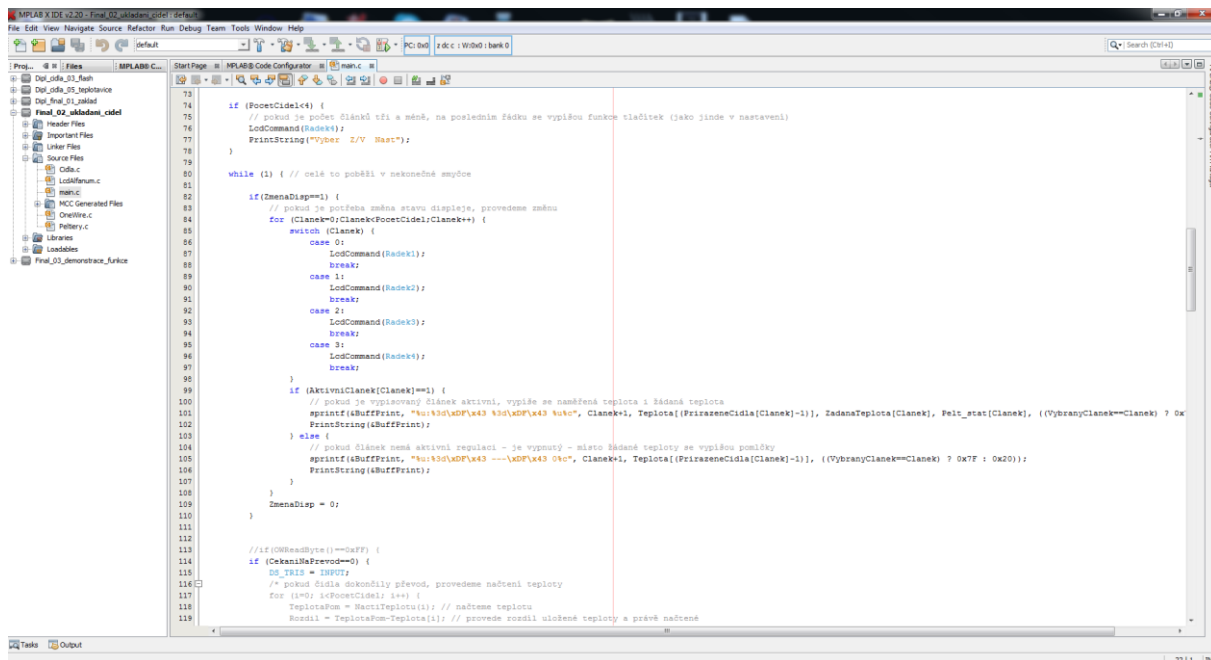
Legenda: m – materiálová konstanta (měď = 80), S – průřez vodiče (mm^2)

$$I_{tav} = m \sqrt{\left(\sqrt{\frac{S}{\pi}}\right)^3} = 80 \cdot \sqrt{\left(\sqrt{\frac{2,5}{\pi}}\right)^3} \doteq 67 \text{ A} \quad 17$$

4.4 Program mikropočítače

Program pro mikropočítač PIC16F1518 byl napsán v jazyce C. Při programování bylo využito vývojové prostředí MPLAB X IDE přímo od výrobce mikropočítače Microchip společně s kompilátorem jazyka C.

Kompletní kód ve všech hlavičkových a zdrojových souborech je v elektronické příloze práce. Celý kód je bohatě okomentován. Jednotlivé funkční celky jsou seskupeny do samostatných zdrojových souborů.

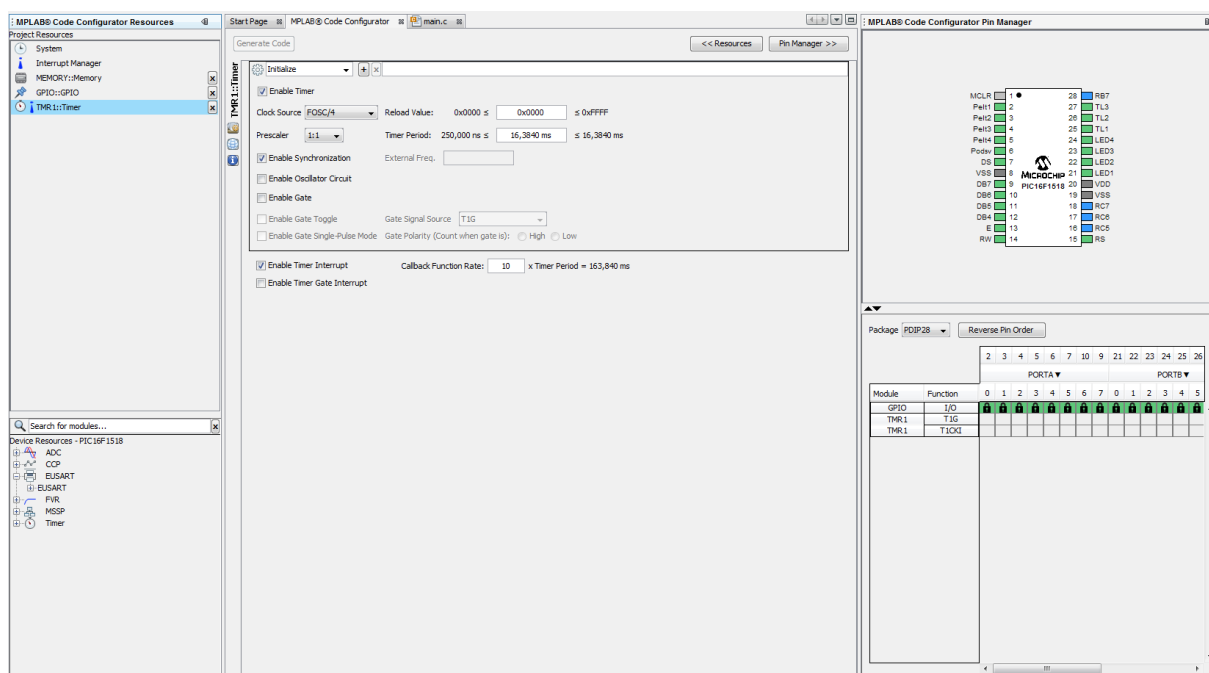


Obrázek 32 – vývojové prostředí MPLAB X IDE

Součástí vývojového prostředí je doplněk MPLAB® Code Configurator. Jedná se o velice užitečný podprogram, pomocí něhož lze jednoduše nastavit veškeré periferie mikropočítače. Postupně se zde nastaví systémové požadavky na oscilátor, ochranu paměti programu před čtením apod., dále

přerušovací systém a jednotlivé další periferie. Program automaticky vygeneruje hlavičkové soubory a funkce na obsluhu jednotlivých periférií. Velmi je tak usnadněna role programátora, který nemusí znát všechny registry a jejich potřebná nastavení.

Také jednotlivé piny mikropočítače lze jednoduše přiřadit, nastavit jako vstupy či výstupy, definovat úroveň po zapnutí a také pojmenovat podle jejich funkce. Program poté vytvoří definice a identifikátory, které může programátor použít v programu, aniž by znal číslo pinu. Na obrázku 33 vidíme obrazovku nastavování časovače-čítače Timer1. V pravé části okna je náčrt jednotlivých pinů mikropočítače společně s přiřazením funkcí. V levé části okna je seznam dostupných periférií mikrokontroléru (dole) a seznam použitých periférií (nahore). Na konci nastavování jsou soubory vygenerovány kliknutím na tlačítko Generate Code v horní části okna.



Obrázek 33 – doplněk MPLAB® Code Configurator

Pokud během programování dojde ke změně požadavků na nastavení periférií nebo je potřeba přidat nové, doplněk automaticky vygeneruje jen příslušné soubory, případně upraví stávající.

4.4.1 Hlavní smyčka

Celý program hlavní smyčky je umístěn v souboru *main.c*. Na začátku se provede inicializace periférií pomocí funkcí vygenerovaných doplněkem MPLAB® Code Configurator, poté nastavení alfanumerického displeje a nakonec povolení všech přerušování.

Po základním nastavení systému následuje uživatelské nastavení, kde program vyhledá čidla připojená na sběrnici a následně se dotazuje uživatele, má-li načíst nastavení teploty a dalších parametrů z paměti.

Po provedení těchto úkonů následuje nekonečná smyčka, ve které program vypisuje na displej hodnoty žádané a skutečné teploty chladicích článků, obsluhuje sběrnici s čidly, testuje stisknutá tlačítka a provádí samotnou regulaci.

Každý proces nastavení je umístěn v samostatné funkci a pro větší přehlednost jsou související celky seskupeny do samostatných zdrojových souborů. V souboru *OneWire.c* se nachází knihovna pro práci s jednovodičovou sběrnici, v souboru *Cidla.c* se nachází funkce pro vyhledání a uložení čidel na sběrnici. *Peltiery.c* obsahuje funkce pro nastavení parametrů chladicích článků a *LcdAlfanum.c* zajišťuje komunikaci s alfanumerickým displejem. V podsložce *mcc_generated_files* jsou pak soubory vygenerované pomocí doplňku MPLAB® Code Configurator

4.4.2 Přerušení

Jednotlivé funkce obsluhy přerušení jsou umístěny v příslušných souborech periférií, které přerušení vyvolají. Nejobsáhlejší je přerušení od časovače Timer1, které probíhá s periodou 16,384 ms.

4.4.2.1 Přerušení od Timer1

Přerušení od časovače je rozděleno na dvě části. Jedna část vykonává čtení tlačítek a ochranu proti zákmitům a rušení na nich. Tato část probíhá s výše zmíněnou krátkou periodou cca 16 ms. Ochrana proti zákmitům pracuje s aktuálně přečteným stavem tlačítka a uloženým stavem z minulého cyklu. Pokud jsou oba stavy tlačítka stejné, program považuje tento stav za platný a v interní proměnné *Tlacitka* nastaví příslušný bit tlačítka podle stavu na stisknuté (bit je v 1), nebo klidová poloha (bit je v 0). Tak je zajištěno, že mezi čtením tlačítek je prodleva cca 16 ms. Za tuto dobu odezní většina poruchových jevů nastalých při změně stavu mechanických kontaktů.

Druhá část se provádí jednou za 10 cyklů přerušení od časovače. Tato část zajišťuje pulzně-šířkovou modulaci. Softwarová PWM byla zvolena z důvodu malého počtu PWM kanálů v perifériích mikropočítače. Program obsluhuje celkem 4 kanály PWM, pro každý chladicí článek zvlášť. Každý kanál má 4 stavy označené čísly 0 až 3 v proměnné *Pelt_stat[]*. Nula označuje úplně vypnutý kanál, číslo 3 označuje plný výkon (střída 100 %) a čísla 1 a 2 označují mezistupně modulace. Tyto mezistupně jsou uživatelsky nastavitelné po skocích o velikosti 10% a to v rozsahu 10% až 90%.

Součástí obou bloků přerušení od časovače jsou také pomocné časovače pro hlavní smyčku a podprogramy. Pomocný časovač je proměnná v paměti, která se při každém cyklu přerušení od časovače sníží o jedničku. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud proměnná dosahuje nenulové hodnoty. Poté je proces zastaven a obnoven může být vložením nenulového čísla do proměnné v hlavní smyčce programu.

4.4.2.2 Přerušení od sériového portu UART

Obsluha sériového portu má dvě části, a to vysílací a přijímací. Obě části disponují zásobníkem o velikosti 8 slov. Vysílací část je napojena na funkce knihovny *stdio.h*. Umožňuje tak velmi jednoduché vysílání pomocí předdefinované funkce *printf*. Přijímací část je rezervována pro možnost ovládání nadřazeným systémem pomocí jednoduchých příkazů.

4.5 Ovládání systému

Systém lze nastavovat pomocí tří tlačítek v různých režimech. Na všech nastavovacích obrazovkách jsou na posledním řádku displeje vždy napsány funkce jednotlivých tlačítek. Při popisování budu označovat tlačítka zleva doprava jako tlačítko 1 až 3.

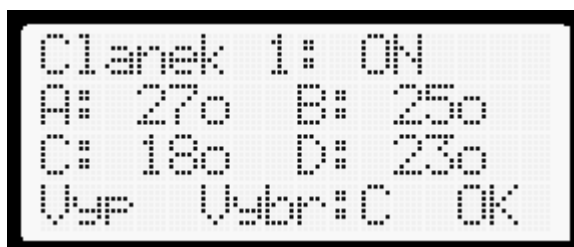
4.5.1 Prvotní nastavení

Po zapnutí systém vyhledá na OneWire sběrnici všechna připojená čidla a zobrazí jejich počet. V případě jediného nalezeného čidla jej okamžitě přiřadí a tuto informaci také vypíše:



Obrázek 34 – načtení čidel na sběrnici OneWire po zapnutí

Pokud je čidel více, je nutné každé čidlo přiřadit ke konkrétnímu chladicímu článku, aby mohla regulace fungovat správně. Obrazovka displeje je na obrázku 35. Číslo na prvním řádku indikuje chladicí článek, k němuž čidlo přiřazujeme. Za dvojtečkou nápis ON nebo OFF indikuje sepnutí výkonového stupně napájení tohoto chladicího článku. Stav sepnutí lze změnit tlačítkem 1 na displeji označeným jako „Zap“ nebo „Vyp“. Toto řešení je použito z důvodu snadné identifikace článku a k němu přidruženého čidla. Po zapnutí článku začne na jednom z čidel výrazně klesat teplota. Toto čidlo pak uživatel vybere prostředním tlačítkem 2. Na displeji se u popisu tlačítka 2 „Vybr:“ zobrazuje označení čidla, které uživatel zvolil. Tlačítkem 3 se tato volba potvrdí, čidlo se přiřadí k danému chladicímu článku a pokračuje se identifikací následujícího čidla. Po nastavení všech čidel se na posledním řádku zobrazí text „>>Potvrzeno<<“ a následuje další část nastavení.



Obrázek 35 – přiřazení čidel ke článkům

V dalším kroku uživatel zvolí, má-li se načíst nastavení žádané teploty, střídý PWM a hystereze výkonových stupňů z Flash paměti mikropočítače. Výzvu lze potvrdit stisknutím tlačítka 1 jako „Ano“ nebo tlačítka 2 jako „Ne“. V případě volby „Ano“ proběhne načtení výše uvedených parametrů do paměti RAM a program skočí přímo na hlavní proces regulace. V případě volby „Ne“ program pokračuje následovně (Obrázek 36).



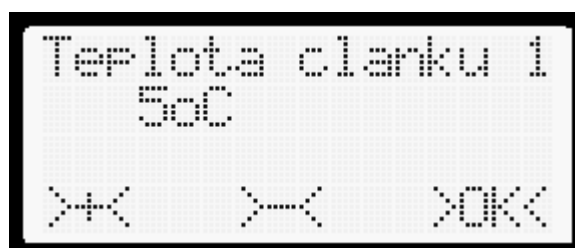
Obrázek 36 – provádění nastavení výkonu snížených stupňů chlazení

Regulace výkonu článku bude podrobněji popsána dále v části hlavního procesu regulace. Třetí stupeň výkonu je trvale nastavený na 100 %, druhý stupeň má výchozí nastavení 70 %, první stupeň 40 % a nultý stupeň je 0 %. Tlačítky 1 a 2 lze procentuální hodnotu PWM střidy měnit a to skoky po 10 %. Tlačítkem 3 se přepíná nastavování mezi prvním a druhým stupněm. Pro uložení do paměti se tlačítko 3 stiskne na dobu alespoň 2 sekund. Po tomto potvrzení se na posledním řádku displeje vypíše text „>>Potvrzeno<<“ a nastavená data se uloží do paměti RAM. Současně se tyto hodnoty ihned zálohují do paměti Flash mikropočítače. Následuje nastavení teplotní hystereze výkonových stupňů regulace.



Obrázek 37 – nastavení hystereze výkonových stupňů regulace

Na obrázku 37 je obrazovka podobná jako v předchozím případě nastavování výkonových stupňů. Hodnoty jsou zobrazeny ve stupních Celsia, nastavování i potvrzení je stejné jako v předchozím případě. Po potvrzení teplot následuje fáze nastavování žádané teploty chladicích článků.



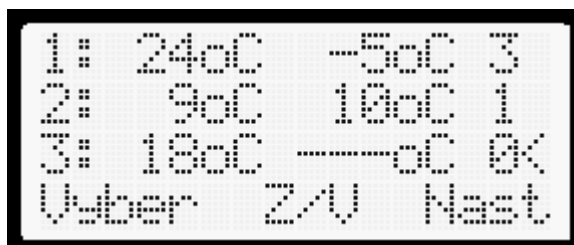
Obrázek 38 – nastavení žádané teploty článku

Na displeji se zobrazí obrazovka na obrázku 38. Tlačítkem 1 a 2 lze zvyšovat a snižovat teplotu zobrazenou na druhém řádku. Pro potvrzení slouží tlačítko 3, avšak pouze krátkým stiskem. Pokud je v systému zavedeno více chladicích článků, je možné nastavit žádanou teplotu každému z nich zvlášť. Po stisknutí tlačítka 3 se číslo nastavovaného článku zvýší o jedničku, avšak žádaná teplota se převezme z nastavení minulého článku. Pokud tedy uživatel chce nastavit žádanou teplotu všech chladicích článků stejnou, stačí jen několikrát za sebou stisknout tlačítko 3 pro potvrzení této teploty u

všech. Po nastavení žádané teploty posledního chladicího článku se na 4. řádku displeje zobrazí potvrzení „>>Nastaveno<<“ a program přejde do regulačního režimu.

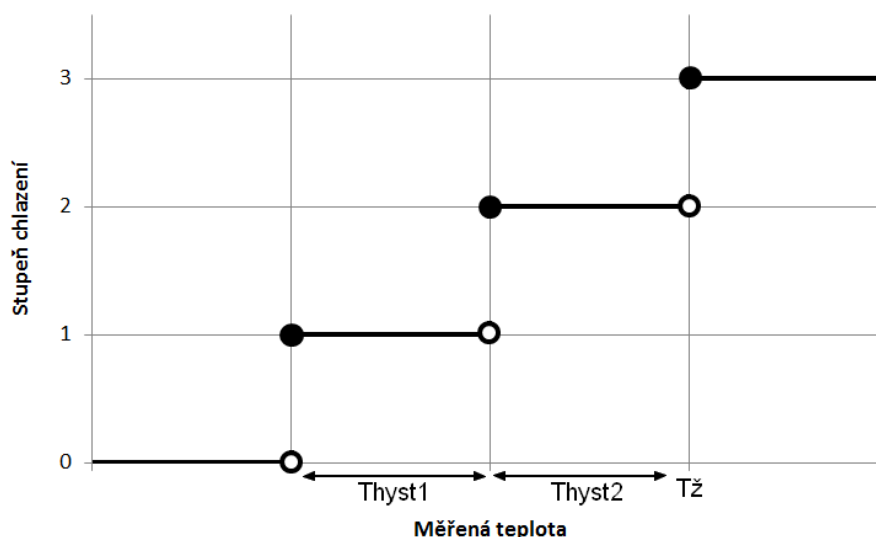
4.5.2 Hlavní regulační režim

Po nastavení všech parametrů potřebných pro fungování programu se zobrazí na displeji následující text.



Obrázek 39 – základní regulační režim (3 připojené články)

Pokud je připojených článků více než jeden, na každém řádku se nachází informace o jednom článku. Na začátku každého řádku je číslo chladicího článku (koresponduje se signalizačními LED), první údaj je teplota měřená teplotním čidlem umístěným na chladicí ploše článku, druhý údaj je nastavená žádaná teplota chlazení. Pokud je místo žádané teploty symbol pomlček (jako na obrázku 39), příslušný článek je neaktivní (vypnutý). Číslo na konci řádku signalizuje chladicí výkon článku. Regulační algoritmus je popsán na obrázku 40.



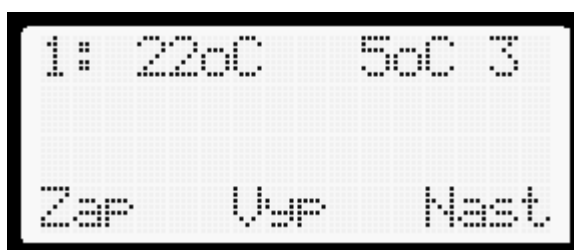
Obrázek 40 – princip regulace chlazení, hodnoty Thyst1, Thyst2 a Tž jsou uživatelsky nastavitelné

První stupeň chlazení by měl být nastaven mezi 10 až 50 % výkonu. Druhý stupeň chlazení pak mezi 50 až 90 %. Konkrétní nastavení je nutno přizpůsobit výkonu Peltierova článku a způsobu odvádění

tepla z živé tkáně. Dobře prokrvená místa zahřívají článek více a je vhodné nastavit větší výkon snížených stupňů, zejména má-li chladicí hlavice velkou plochu.

Kromě textové indikace na displeji je stav výstupu indikován svítivou diodou vedle příslušného řádku displeje. Pokud dioda svítí, příslušný článek je sepnut alespoň na 1. stupeň chlazení. Pokud je dioda zhasnutá, článek je úplně vypnutý.

Na spodním řádku je naznačena funkce tlačítek (pokud jsou chladicí články 3 a méně). Tlačítkem 1 lze zobrazit šipku na konci řádku a touto šipkou vybírat některý z chladicích článků. Tlačítek 2 se vybraný článek (na jehož řádku je zobrazena šipka) přepíná z aktivní do neaktivního režimu a naopak. Lze tak v případě potřeby vypnout chlazení na některé chladicí hlavici, aniž by bylo nutné vypínat celý systém. Neaktivní článek je symbolizován pomlčkami místo žádané teploty. Tlačítkem 3 lze přejít do režimu nastavení.



Obrázek 41 – regulace jediného článku

V případě jediného připojeného článku se zobrazí obrazovka podobná obrázku Obrázek 41. Tlačítko 1 slouží k zastavení regulace, tlačítko 2 k opětovnému spuštění. Vypnutá regulace je signalizována stejně jako v případě více připojených článků pomocí pomlček na místě žádané teploty. Tlačítko 3 má stále stejnou funkci – nastavovací menu.

V režimu nastavení neprobíhá regulace teploty, všechny chladicí články jsou po dobu nastavování vypnuty. Uživatel může nastavit výkonové stupně, teplotní hysterezi a žádané teploty článků.



Obrázek 42 – výběr nastavení

Nejprve uživatel vybere pomocí tlačítka 1 nastavovanou veličinu. Tlačítkem 3 pak přejde k samotnému nastavování. Toto je stejné jako při uvedení systému do chodu a je popsáno v úvodu kapitoly. Pokud nastal omyl a uživatel se chce vrátit zpět do regulačního režimu, stiskne tlačítko 2.

5. Ověření činnosti systému

Regulační funkce byla ověřována na dvou chladicích – bodové a plošné. Výkon Peltierova článku v těchto hlavících je 50 W. Na obrázku Obrázek 43 je ukázka bodové chladicí hlavice. Je patrné, že chladicí plocha není příliš velká, proto je i výsledný výkon nízký. Pro tuto hlavici stačilo nastavit 1. chladicí stupeň na 40 % a 2. chladicí stupeň na 70 %. Po vychlazení na žádanou teplotu byl výstup po většinu času na 1. stupni.

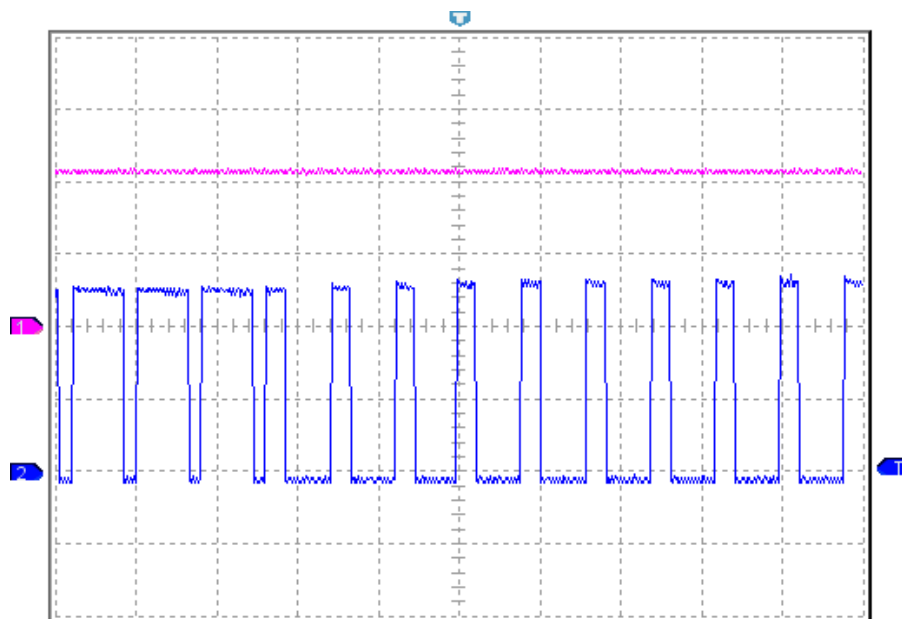


Obrázek 43 – chladicí hlavice bodová

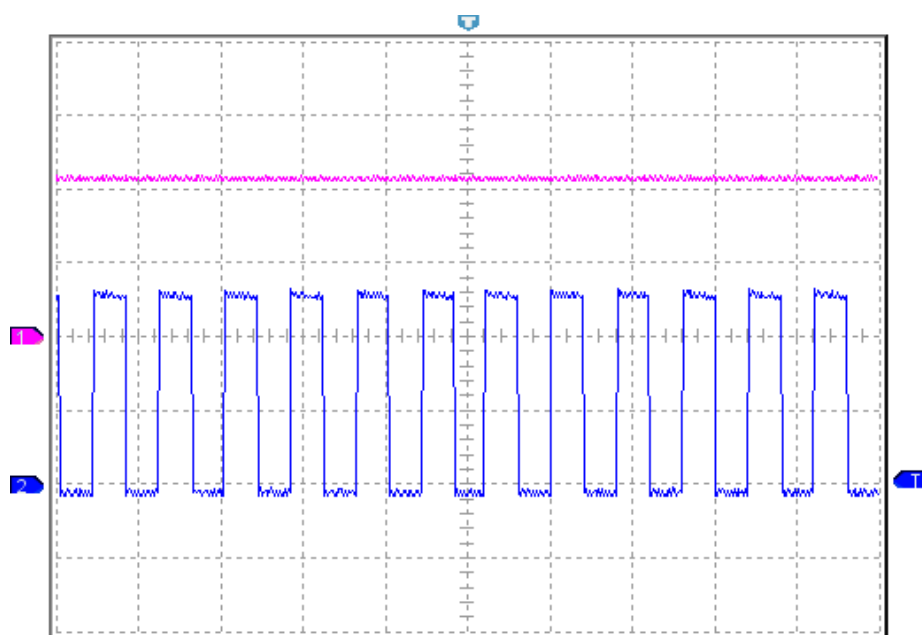
U plošné chladicí hlavice byl odvod tepla z tkáně mnohem vyšší a pro kolísání teploty bylo nutné nastavit vyšší výkon mezistupňů. Z toho vyplývá, že je nutné adaptovat nastavení pro konkrétní chladicí hlavici.

Oproti původnímu způsobu regulace s reléovým výstupem byla regulace s PWM mezistupni přesnější a měřená teplota se pohybovala v rozmezí ± 1 až $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bylo experimentováno s různým nastavením výkonových mezistupňů. U hlavice s větší chladicí plochou bylo (podle očekávání) nutné nastavit vyšší střídu pro dosažení nižšího kolísání teploty.

Na první pohled bylo patrné, že regulace s mezistupni modulovanými pulzně-šířkovou modulací je přesnější a efektivnější. Protože se Peltierův článek nevypíná úplně, ale pouze se snižuje jeho příkon, nedochází ke změně směru přenosu tepla skrze článek a ohřevu chladicí strany hlavice teplem z chladicí vody. To také snižuje spotřebu elektrické energie.



Obrázek 44 – střída 30 % (patrný přeběh z vyššího mezistupně); růžová – napětí článku (5 V/div); modrá – proud článku (2 A/div); horizont. osa 200 ms/div



Obrázek 45 – střída 50 %; růžová – napětí článku (5 V/div); modrá – proud článku (2 A/div); horizont. osa 200 ms/div

6. Závěr

Byl proveden rozbor jednotlivých způsobů chlazení se zaměřením na ochlazování živé tkáně. Jsou popsány způsoby chlazení pomocí chladicích gelů, sprejů a také tradiční způsob s ledem. Byly nastudovány způsoby chlazení a procesy v organismu, které probíhají v případě podchlazení.

Po zhodnocení tradičních způsobů chlazení následuje podrobný popis fyzikálního principu Peltierova jevu a po něm přehled důležitých parametrů vyráběných Peltierových článků. Dále je popsáno chování článků v praktické aplikaci. Jsou uvedeny parametry vybraných vyráběných článků a na konci kapitoly je zhodnocena efektivita článků.

Bylo zjištěno, že účinnosti Peltierova jevu je velmi malá a nehodí se pro velké chladicí výkony. S rostoucím teplotním rozdílem mezi studenou a horkou stranou článku jeho výkon klesá a na horké straně se pak zvyšuje množství odpadního tepla produkovaného samotným článkem.

V další části práce je proveden stručný rozbor regulací řešeného chladicího systému. Jako ideální způsob by se jevil PID regulátor, ale pro danou aplikaci není tak vysoká přesnost regulace potřeba. Byl zvolen způsob na hranici hysterezní a proporcionální regulace. Tento způsob regulace byl následně ověřen v praxi na prototypu zařízení a byly zjištěny velmi dobré výsledky. Udržování teploty probíhá s přesností 1 až 2 °C. Tyto odchylky jsou velmi dobré pro zvažované použití chladicího systému na ochlazování živé tkáně.

Samotný regulační systém je podrobně popsán a zdokumentován. Je uveden podrobný popis jak schématu, tak i samotné fyzické realizace včetně výpočtů chladičů a dalších provozních součástí. V závěru práce je uveden přehledný návod s ukázkami jednotlivých výpisů displeje pro snadné pochopení a nastavení příslušných parametrů.

7. Literatura

- [1] *PIC16(L)F1516/1517/1518/1519 Data Sheet* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001452F.pdf>
- [2] *Produktinformation Type: PR19/20/SE* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.620-008.1.pdf>
- [3] *Datasheet L7800 Series* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.330-149.1.pdf>
- [4] *Datasheet MC1605A12W* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1934379.pdf>
- [5] *Datasheet TLP521* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/91035.pdf>
- [6] *Datasheet LTI161* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1605112.pdf>
- [7] *Chladiče pro polovodiče* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.072-451.1.pdf>
- [8] *Léčba chladem* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://equi.wz.cz/lecba_chladem.html
- [9] *Chladicí gel* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.autochladnicky.eu/softice600-gelovy-chladici-polstarek-ezetil-p8>
- [10] *Chladicí sprej* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.lekarna.cz/cryos-spray-400ml/>
- [11] *Blanketrol III* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.paragoncare.com.au/products/blanketrol-iii/>
- [12] *Peltierův jev* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [13] *Elektrické teplo* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/elz/elz1.htm>
- [14] *Peltier element design guide* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.meerstetter.ch/compendium/tec-peltier-element-design-guide>
- [15] *Thermoelectric technical info* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.everredtronics.com/tech.html>

- [16] *Thermoelectric Peltier cooling modules-TEC* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.everredtronics.com/thermoelectric.TEC1.html>
- [17] *Peltier effect cooling efficiency test* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: http://rimstar.org/science_electronics_projects/peltier_effect_module_cooling_efficiency_test.htm
- [18] Tavný proud vodičů. NEČÁSEK, Sláva. *Radiotechnika do kapsy*. 2., upravené a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1981, s. 319-320.
- [19] *Technical data sheet FDP7030BL* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2259639.pdf>
- [20] *Chladiče* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/chladice>

8. Seznam příloh

Příloha 1 – kompletní schéma zapojení řídicí desky, předloha plošného spoje řídicí desky

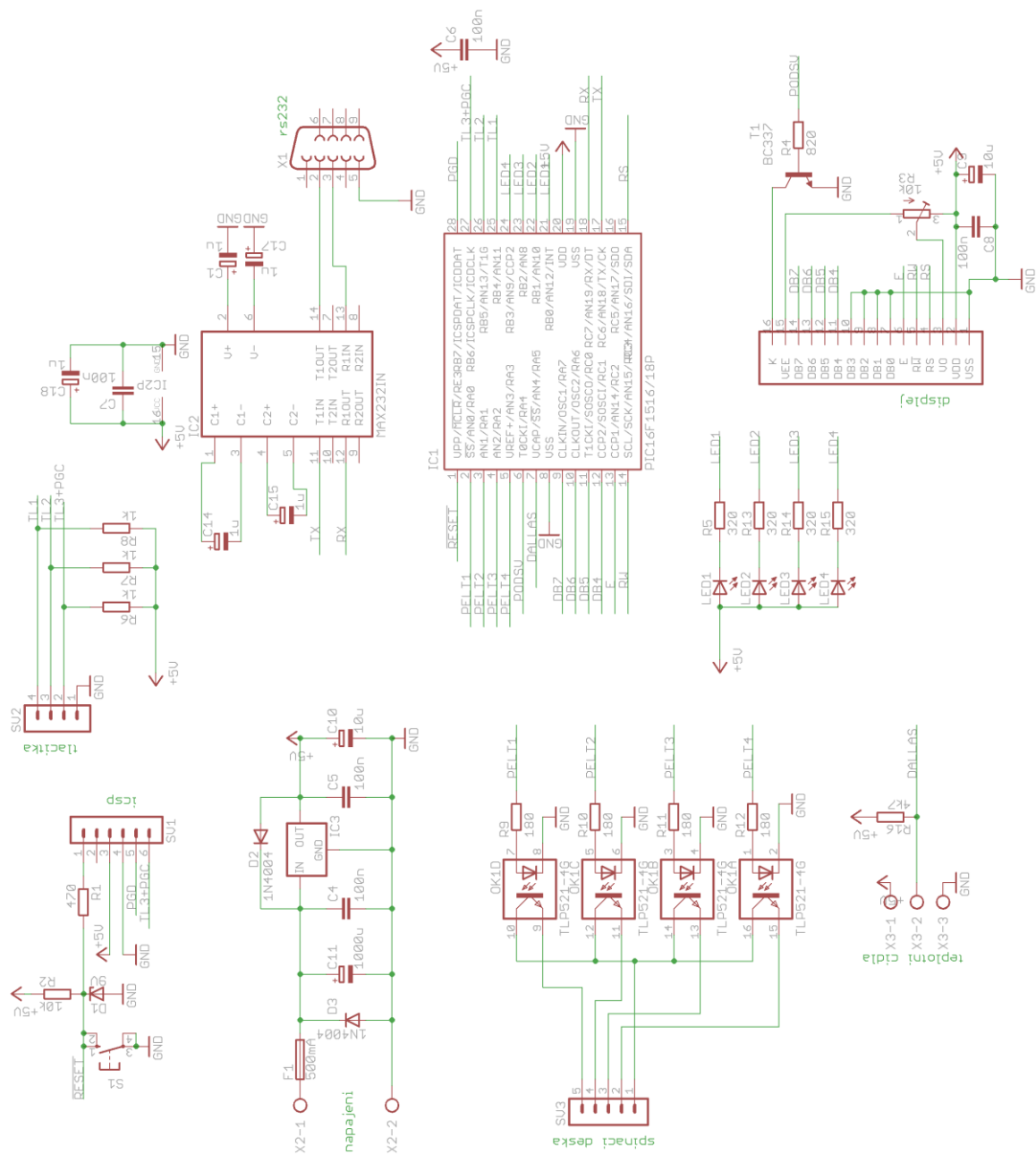
Příloha 2 – kompletní schéma zapojení spínací desky, předloha plošného spoje spínací desky

Příloha 3 – programové vybavení mikrokontroléru ve formě projektu pro vývojové prostředí Microchip MPLAB X IDE (pouze v elektronické formě)

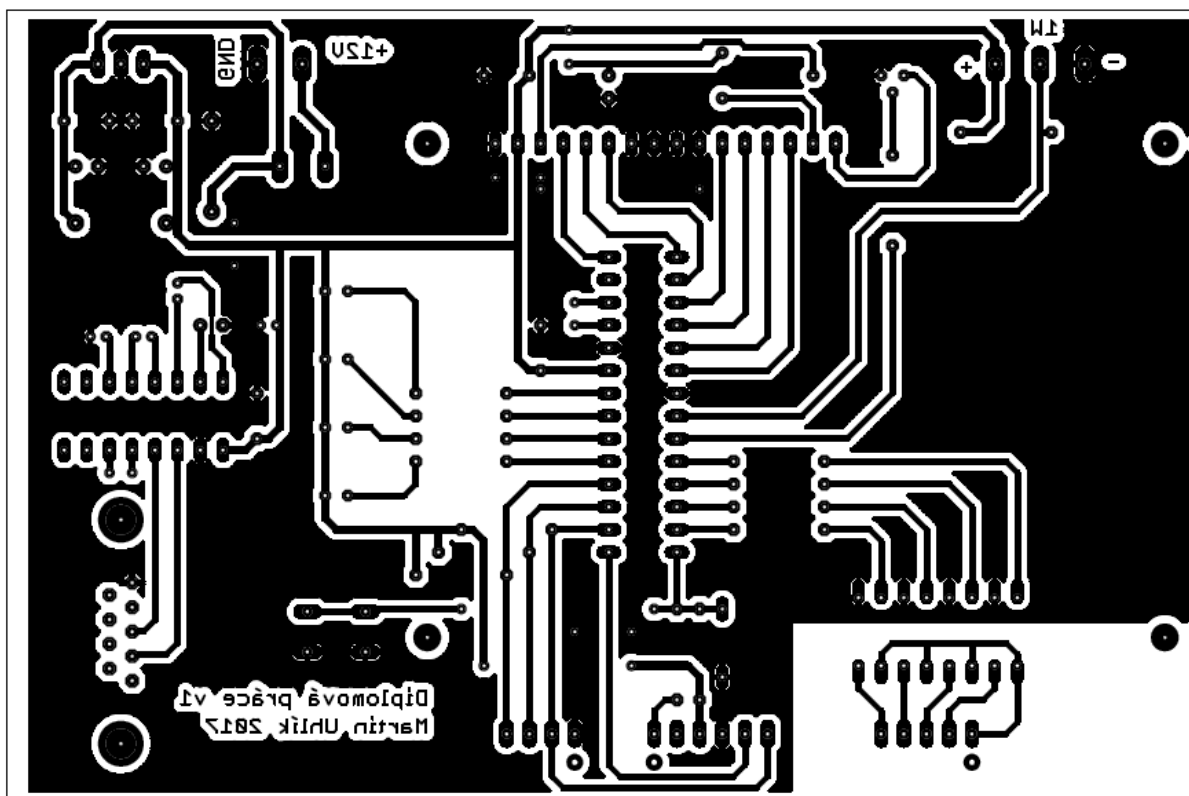
Všechny přílohy jsou také k dispozici v elektronické formě na přiloženém CD.

Příloha 1

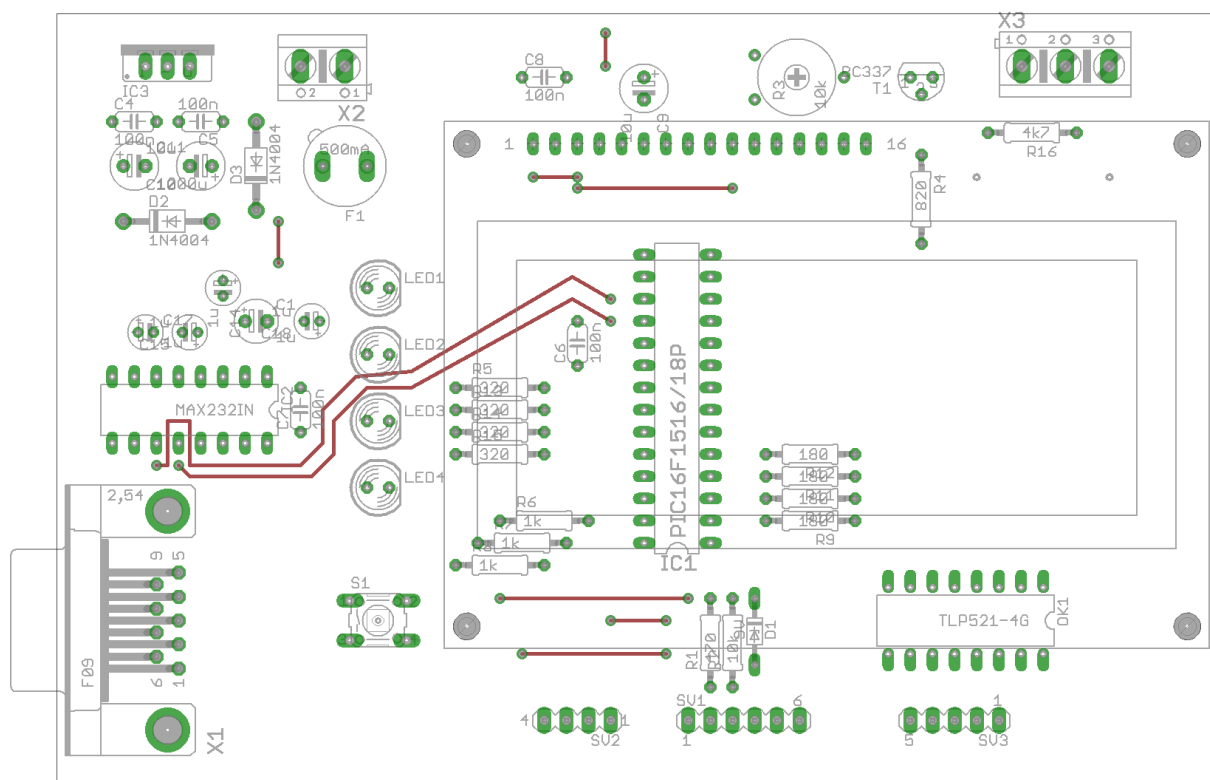
Kompletní schéma zapojení řídicí desky



Předloha plošného spoje řídicí desky

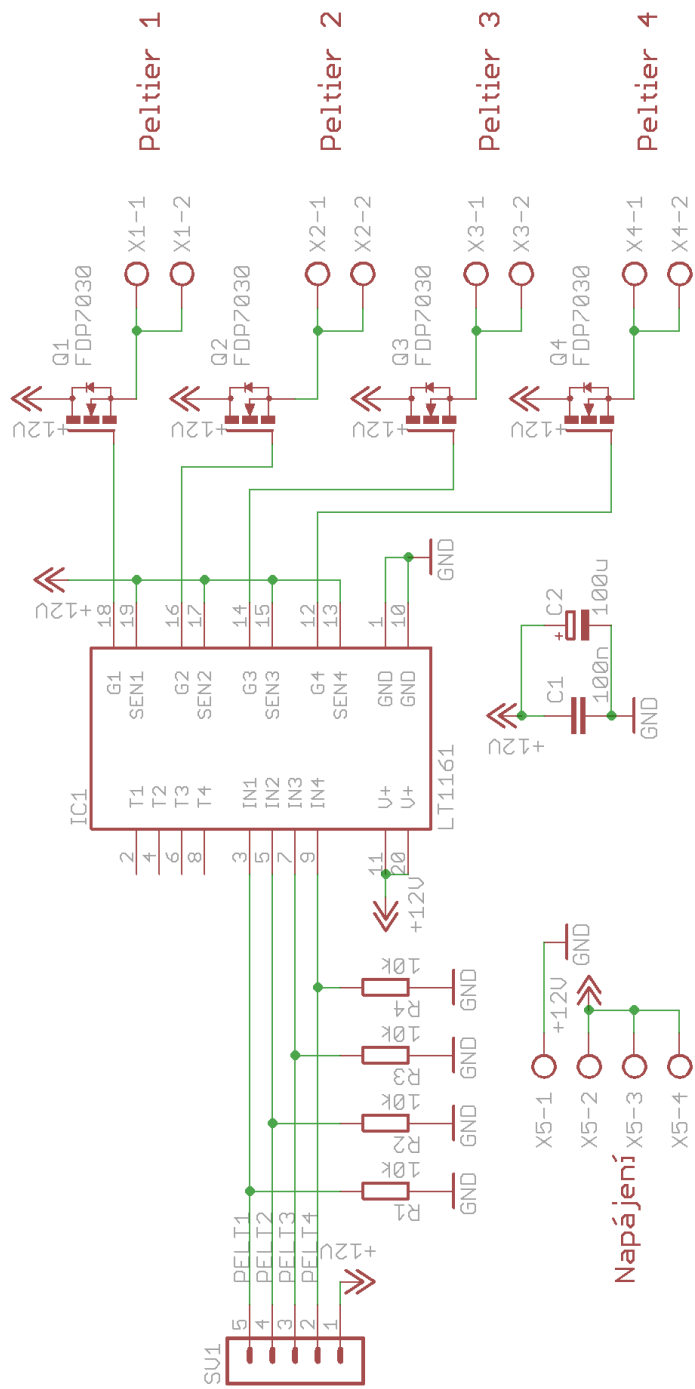


Osazení plošného spoje řídicí desky

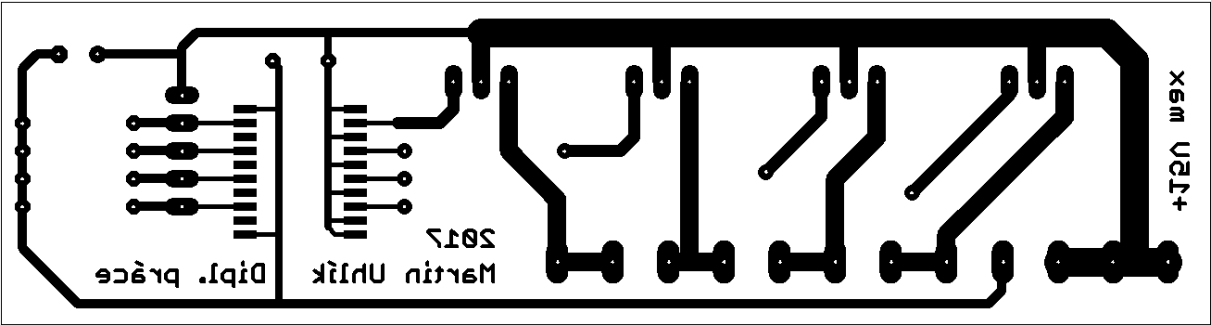


Příloha 2

Kompletní schéma zapojení spínací desky



Předloha plošného spoje spínací desky



Osazení plošného spoje spínací desky

